

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.

"DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DIRECTA DE UN AEROGENERADOR DE IMANES PERMANENTES DE 1.5 MW".

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD INGENIERÍA MECÁNICA.

PRRSENTA:

ING. IVAN GUERRA GONZÁLEZ.

DIRECTOR DE LA TESIS:

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA.



MEXICO, DF.





Gitte

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

6 del mes de 18:00 horas del día En la Ciudad de México, D. F. siendo las Diciembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. para examinar la tesis titulada: "DISEÑO DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DIRECTA DE **UN AEROGENERADOR DE IMANES PERMANENTES DE 1.5 MW."** Presentada por el alumno: GONZÁLEZ IVAN **GUERRA** Apellido paterno Apellido materno Nombre(s) Con registro: B 0 9 1 7 5 5 aspirante de: MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECÁNICA Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN DE LA TESIS, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes. LA COMISIÓN REVISORA Director(a) de tesis DR. ORLANDO, SUSARREY HUERTA Segundo Vocal Presidente DR. HILARIO HERNÁNDEZ MORENO DR. FERMIN ALBERTO VINIEGRA HEBERLEIN Secretario Tercer-Voca DR. JOSE MARTINEZ TRINIDAD DR. LUIS ARMANDO FLORES HERRERA PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES DR. JAIME ROBLES GARCIA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL secretaría de investigación y posgrado

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de <u>México D.F.</u> el día <u>6</u> del mes <u>Diciembre</u> del año <u>2001</u>, el (la) que suscribe <u>Ivan Guerra González</u> alumno (a) del Programa de <u>Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica</u> con número de registro <u>B091755</u>, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME <u>Unidad Zacatenco</u>, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de <u>Dr. Orlando Susarrey Huerta</u> y cede los derechos del trabajo intitulado <u>"DISEÑO DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN DIRECTA DE UN</u> <u>AEROGENERADOR DE IMANES PERMANENTES DE 1.5 MW"</u>, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección <u>igg09@hotmail.com</u>. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Ivan Guerra González

Nombre y firma



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo representó un gran reto para mi superación profesional, académica y científica. El haber podido culminar esta tesis de grado no fue tarea fácil y no hubiera sido posible sin el apoyo de todas las personas que estuvieron siempre conmigo alentándome a seguir adelante. A ellos les dedico las siguientes frases:

Agradezco a Dios por darme unos Padres Ismael y Cruz, quienes me guían en la vida.

A mis Hermanos Irvin y Mariana que me llenan de calidez. A mi novia Itzía que me llena de motivación.

Quiero agradecer a mi asesor Dr. Orlando Susarrey H. quien siempre me alentó con paciencia y consejo en el desarrollo del trabajo de tesis.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



RESUMEN

El presente trabajo de tesis consiste en el diseño de un Sistema de Transmisión Directa, para un aerogenerador de imanes permanentes con una capacidad de producción de 1.5 MW, se presenta un análisis del viento de la región conocida como la Ventosa en Oaxaca, México.

Se realiza un análisis para la selección de la pala, el cubo y el generador de imanes permanentes; se analizan las cargas que estos elementos de acoplamiento ejercen sobre el Sistema de Transmisión Directa, y se toman como referencia para realizar un dimensionamiento sobre del sistema. Asimismo, se describe el procedimiento de diseño del Sistema de Transmisión Directa.

Al obtener el diseño del Sistema de Transmisión Directa, y mediante el uso del software ANSYS, se realizan simulaciones de las cuales se obtienen resultados como las frecuencias naturales de vibración, esfuerzos de Von Mises, deformaciones totales, también se realiza un análisis de fatiga.

Finalmente se discuten los resultados obtenidos en las simulaciones con ANSYS, se escriben las conclusiones a las que se llegaron con el presente trabajo, así como las propuestas para trabajos futuros.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



ABSTRACT

This thesis is the design of a direct drive system for a wind turbine permanent magnet with a production capacity of 1.5 MW, is an analysis of the wind in the region known as La Ventosa in Oaxaca, Mexico.

An analysis for the selection of the blade, the hub and the permanent magnet generator, analyzes loads coupling these elements have on the Direct Drive System, and are taken as a reference for sizing on the system. It also describes the design procedure of the Direct Drive System.

By getting the design of direct drive systems, and by using ANSYS software, simulations are carried out which results are obtained as the natural frequencies of vibration, Von Mises stress, total strain, also performed a fatigue analysis.

Finally we discuss the results of the simulations with ANSYS, you write the conclusions that were reached with this work and proposals for future work.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Índice

Página

Resumen.	i
ABSTRACT.	ii
Índice.	iii
Índice de Figuras.	vi
Índice de Tablas.	viii
CAPÍTULO 1.	1
INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Estado del Arte	3
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivos	6
1.4 Referencias	7
CAPÍTULO 2.	8
CONCEPTOS GENERALES	8
2.1 Energía del viento	8
2.2 Desarrollo Histórico	9
2.3 Principio Funcional Básico de un Aerogenerador	11
2.3.1 Rotor	12
2.3.1.1 Aspas	12
2.3.1.2 Cubo	13
2.3.1.3 Nariz	13
2.3.2 Caja de Engranes	13
2.3.3 Generadores Eléctricos	14
2.3.4 Sistemas de Regulación de Potencia y Velocidad	15
2.3.4.1 Control por Angulo de Paso de las Aspas	15
2.3.5 Sistemas de Orientación	16
2.3.6 Sistemas de Seguridad	16
2.3.6.1 Controladores Electrónicos Locales	17
2.3.7 Chasis Principal	18
2.3.8 Torres	19





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Página 2 A Chariffing si én da las anna sun an danna	a
2.4 Clasificación de los aerogeneradores	
2.5 Energía Eólica Panorama Mundial23	
2.6 Energía Eólica Panorama en México24	
2.7 Referencias	
CAPÍTULO 3.	
METODOLOGÍA DEL PROYECTO "QFD"	
3.1 Introducción27	
3.2 Despliegue de la función de calidad (Quality Function Deployment – QFD)28	
3.3 Estudio del usuario	
3.3.1 Lista de demandas de usuario	
3.3.2Estructuración de las demandas	
3.4 Priorización de las demandas	
3.4.1 Introducción de las demandas en la casa de la calidad	
3.5 Estudio comparativo con productos de la competencia	
3.6 Traducción de los requerimientos del cliente en términos mensurables de	
ingeniería	
3.7 Establecimiento de las metas de diseño	
3.8 Referencias40	
CAPÍTULO 4	
DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN	
DIRECTA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS41	
4.1 Análisis del viento, pala, cubo y generador de imanes permanentes41	
4.1.1 Análisis del viento41	
4.1.2 Pala	
4.1.3Cubo	
4.1.4 Generador de imanes permanentes	
4.3 Análisis de cargas en el sistema de transmisión directa	
4.3.1 Selección del Material	

iv



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Página

4.3.2 Dimensionamiento de los diámetros del Sistema	U
de Transmisión Directa.	63
4.3.3 Cojinetes	72
4.3.4 Dibujo del Sistema de Transmisión.	73
4.4 Análisis Estático Simple	74
4.5 Análisis Modal	77
4.6 Análisis Estático a 20 rpm	81
Análisis de Fatiga	84
Análisis de resultados.	86
Referencias.	93
CONCLUSIONES.	94
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.	95
ANEXO A.	96
ANEXO B.	96



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Lista de Figuras.

Página

Figura 1 Molinos de viento.	10
Figura 2. Elementos que integran un aerogenerador de eje horizontal	20
Figura 3. Parque Eólico "La Venta". Oaxaca, México	25
Figura 4. Secuencia de matrices de QFD	28
Figura 5. La casa de la calidad como caja negra.	29
Figura 6. Agrupación de las demandas (primarias-secundarias-terciarias)	33
Figura 7. Priorización de demandas	35
Figura 8.Introducción de las demandas en la Casa de la Calidad	36
Figura 9.Demandas en la Casa de la Calidad.	37
Figura 12. Velocidad relativa – Meses del período 2003 a 2009	42
Figura 13. Velocidad de las ráfagas – Meses del período 2003 a 2009	42
Figura 14. Pala NACA 63 – 212 dibujada en ANSYS	43
Figura 15. Pala Seccionada NACA 63 – 218	44
Figura 16. Segundo modo de la pala, frecuencia 1.8459 Hz.	45
Figura 17. Cubo de Aerogenerador VESTAS con freno aerodinámico	47
Figura 18. Generador eléctrico tipo: FRPMM	47
Figura 19. Rotor de imanes permanentes acotada (m).	49
Figura 20. Estator de imanes permanentes sin imanes	50
Figura 21. Vista frontal, Imán de Neodimio	51
Figura 22. Vista Lateral Imán de Neodimio	51
Figura 23. Corona de imanes permanentes	52
Figura 24. Estator de imanes permanentes con imanes	52
Figura 25. Configuración de los elementos que se acoplan al Sistema de transmi	sión. 53
Figura 26. Diagrama de cuerpo libre del sistema de transmisión directa.	54
Figura 27. Diagrama fuerza cortante y momento (x,y)	57
Figura 28. Diagrama fuerza cortante y momento (x,z).	60
Figura 29. Sistema de transmisión directa	73

vi



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Página

Figura 30. Condiciones de simulación para el sistema	-
de transmisión directa	.74
Figura 31. Esfuerzos (Von – Mises) en el elemento.	.75
Figura 32. Deformación del elemento en la dirección X.	.75
Figura 33. Deformación Total del elemento.	.76
Figura 34. Modo de vibración 1	.77
Figura 35. Modo de vibración 2	.78
Figura 36. Modo de vibración 3	.78
Figura 37. Modo de vibración 4	.79
Figura 38. Modo de vibración 5	.79
Figura 39. Modo de vibración 6	.80
Figura 40. Condiciones de Simulación Estática a 20 rpm	.81
Figura 41. Esfuerzo (Von – Mises).	.82
Figura 42. Deformación Total del elemento.	.82
Figura 43. Deformación en la dirección X.	.83
Figura 44. Comportamiento del elemento a 1000 000 de ciclos	.84
Figura 45. Daños por fatiga a 1000 000 de ciclos.	.84
Figura 46. Fatiga multiaxial	.85
Figura 47. Modo de vibración 1, representado por vectores	.86
Figura 48. Modo de vibración 2, representado por vectores	.87
Figura 49. Modo de vibración 3, representado por vectores	.87
Figura 50. Esfuerzos Equivalente de Von – Mises en el elemento	.88
Figura 51. Deformación Total del elemento.	.89
Figura 52. Esfuerzo (Von – Mises).	.89
Figura 53. Deformación Total del elemento.	.90
Figura 54. Comportamiento del elemento a 1000 000 de ciclos	.91
Figura 55. Daños por fatiga a 1000 000 de ciclos	.91
Figura 56. Fatiga multiaxial.	.92
Figura 57. Esfuerzo (Von – Mises).	94

vii



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Lista de Tablas

Página

Tabla A. Traducción de los requerimientos del cliente en Términos mensurables de	-
ingeniería	38
Tabla B. Establecimiento de la metas de diseño	39
Tabla 1. Promedio de la velocidad del viento (2003 – 2009)	41
Tabla 2. Especificaciones Técnicas de la pala NACA 63- 212	44
Tabla 3. Frecuencias Naturales de la pala NACA 63 – 212	45
Tabla 4. 3 modos de vibración en la pala a velocidad máxima de 25 rpm	46
Tabal 5. Características del Cubo.	46
Tabla 6. Características del generador eléctrico.	48
Tabla 7. Características del imán de Neodimio	50
Tabla 8. Diámetros obtenidos	69
Tabla 9. Frecuencias naturales obtenidas de la simulación.	77
Tabla 10. Cargas utilizadas en la simulación estática a 20 rpm	81
Tabla 11. Frecuencias naturales obtenidas de la simulación	86

Simbología.

M_a : Momento flexionante alternante.	T_m : Torción medio.
M_{y} : Momento en y.	T_a : Torción alterna.
M_x : Momento en x. T_m : par de tensión medio. Sut: Resistencia ultima a la tensión. Se: Resistencia a la fatiga. Se': Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria. k_a : Factor de modificación de la condición superficial. k_b : Factor de modificación de tamaño. k_c : Factor de modificación de carga. k_d : Factor de modificación de temperatura. k_a : Factor de confiabilidad.	$\begin{array}{l} T: {\rm Torción.} \\ f: {\rm Frecuencia.} \\ \sigma_a: {\rm Esfuerzo \ alternante.} \\ \sigma_m: {\rm Esfuerzo \ medio.} \\ \tau_a: {\rm Esfuerzo \ cortante \ alternante.} \\ \tau_m: {\rm Esfuerzo \ cortante \ alternante.} \\ \tau_m: {\rm Esfuerzo \ cortante \ medio.} \\ k_{fs}: {\rm Factor \ de \ concentración \ de \ esfuerzo \ por \ torción.} \\ K_f: {\rm Factor \ de \ concentración \ de \ esfuerzo \ por \ fatiga-flexión.} \\ K_{fs}: {\rm Factores \ de \ concentración \ de \ esfuerzo \ de \ esfuerzo \ por \ fatiga \ torsión.} \end{array}$
k_f : Factor de modificación de efectos varios.	W_1 : Fuerza. x, y, z : Coordenadas Rectangulares.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En México los procesos convencionales para la generación de electricidad se basan en la quema de combustibles fósiles, emiten cantidades importantes de gases de efecto invernadero y de contaminantes atmosféricos. Se atribuye a estos procesos ser la fuente principal de emisiones de bióxido de carbono. Por ello, es necesario ver en las energías renovables como un medio para diversificar la generación de energía eléctrica que puede contribuir a mitigar el cambio climático global. Además, las fuentes fósiles comenzarán a escasear en los próximos años y se tiene la necesidad de buscar fuentes alternas de energía, para cubrir las necesidades requeridas. El viento que es un recurso energético inagotable ayuda a la salud de los mexicanos y al medio ambiente, debido a que su energía constituye una alternativa para dar cobertura a las necesidades de electricidad nacional, por medio de aerogeneradores.

Los aerogeneradores de eje horizontal son los más utilizados. A pesar de la aparente sencillez de su principio funcional básico, el desarrollo de la tecnología de aerogeneradores ha presentado retos importantes, como minimizar pérdidas internas mediante el acoplamiento óptimo de todos los elementos mecánicos, lograr que sus características mecánicas se mantengan durante la vida útil mínima. Este hecho motiva el desarrollo e investigación en el área, por lo que en este trabajo de investigación se pretende aumentar la eficiencia del aerogenerador, minimizar los costos de fabricación, instalación y mantenimiento mediante una simplificación integral.

Como una forma de contrarrestar esta problemática, existe la posibilidad de que el aerogenerador de eje horizontal se diseñe con una configuración (generador eléctrico - rotor eólico), sustituyendo el uso de una caja de engranes que presenta grandes pérdidas mecánicas afectando el rendimiento del sistema, conectado directamente a un generador eléctrico de imanes permanentes. Esta nueva configuración podría ofrecer una mayor

1



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



eficiencia para una producción eléctrica de 1.5 MW en la región conocida como La Ventosa en el estado de Oaxaca, México.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



1.1 Estado del Arte

La energía del viento ha tomado un papel importante en el desarrollo de tecnologías de nueva generación. La tecnología de la turbina ha sufrido una transformación dramática durante los últimos 15 años, los aerogeneradores de los años 2000 usan lo último en la electrónica de potencia, aerodinámica, y diseño mecánico.

Barlas (2008) realizó estudios sobre la reducción de cargas en los elementos de los aerogeneradores para obtener mayor eficiencia. Su desarrollo introdujo un material conocido como aero-elástico, teniendo como propiedad principal la flexibilidad para adquirir complejas configuraciones geométricas, así como el análisis y comportamiento en las palas; logrando la reducción de peso sobre el rotor.

Beyene (2006) incorporó un nuevo concepto en el diseño de palas en aerogeneradores, construyendo palas con materiales elásticos, esto permitió utilizar nuevas geometrías, la adaptación de la pala con respecto a la dirección y velocidad del viento automáticamente, logrando con ello la mayor captación de viento.

En los sistemas de conversión de energía del viento, uno de los problemas de operación es el cambio y la discontinuidad de la intensidad del viento. La velocidad del viento fluctúa rápidamente, por lo que llega a ser un problema en las plantas de conversión de energía. Varias técnicas de control se han aplicado para la mejora en la generación de energía por aerogeneradores. Müller (2002) desarrolló el sistema de conversión de energía (WECs). El nuevo método de control reduce los problemas causados por el viento, ya que regula el torque del rotor en el aerogenerador dependiendo de los cambios de velocidad del viento.

Kavamora (2001) estudió el flujo de aire alrededor del rotor Savonius por el método DDM (Domain Decomposition Method), examinando la relación de toque y la relación de energía del rotor causada por las diferencias en la velocidad del viento. El método utilizado fue empleado para la predicción de cargas por el viento en las palas del aerogenerador.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Las palas son componentes importantes en los aerogeneradores ya que son diseñados aerodinámicamente para capturar la máxima energía del viento. Spera (1994) determinó que las palas de eje horizontal son completamente hechos por materiales compuestos. Los materiales compuestos satisfacen el complejo diseño y condiciones de operación requeridas, ya que proveen de buena resistencia estática y a la fatiga.

Los perfiles aerodinámicos de las palas en los aerogeneradores tienen una crucial influencia en la eficiencia del aerogenerador. Jureczko (2005) realizó estudios sobre el torcimiento alrededor del eje elástico de la pala, dando como resultado que la posición del centro elástico sufre cambios por la modificación de posición y forma de la pala. Uso el programa MSC Patran, para obtener el área, momentos de inercia, centro y centroides de la pala.

Maximizando la captura de la energía del viento se diseñaron sistemas de controladores electrónicos en los aerogeneradores, Boukhezzar (2006) propuso un control no lineal de velocidad variable, considerando el torque del generador. Datta y Ranganathan (2003) desarrollaron un algoritmo para los puntos máximos de velocidad variable del aerogenerador. Muljadi y Butterfield (2003) desarrollaron un control estratégico que maximiza y minimiza las cargas por diferentes velocidades del viento.

Florin (2004) desarrolló diferentes herramientas para el análisis entre sistemas mecánicos y eléctricos del aerogenerador, calculando las cargas dinámicas en la estructura de la turbina, teniendo como resultado que en un aerogenerador de eje horizontal, las cargas se dan por la rotación de la carcasa y del rotor con respecto a la torre, considerando los grados de libertad del sistema dinámico.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



1.2 Justificación

Mejorar la eficiencia del aerogenerador de eje horizontal ya que las mayores pérdidas se encuentran en el sistema de transmisión de engranes y por ende nos vemos en la necesidad de diseñar un sistema de transmisión directo aun generador de imanes permanentes, reducir el número de componentes y eliminar; transmisión de engranes, eje y acoplador intermedio, que son propensos a fallas y necesitan un mantenimiento intenso.

El empleo de excitación magnética permanente elimina la necesidad de bobinas de excitación y anillos rozantes de potencia, esto permite un accionamiento sin contacto metal-metal y sin lubricación, con un degaste mínimo. El generador multipolo síncrono de imanes permanentes trabaja directamente a la velocidad del rotor, siendo innecesario una transmisión de engranes de elevado mantenimiento, empleando un rotor externo en vez de interno, se logra reducir el diámetro exterior del aerogenerador. Por lo que este diseño pretende ser uno de los puntos de referencia en materia de innovación tecnológica dentro del sector eólico.

Es por eso que el presente trabajo de investigación resulta de gran importancia como un avance para incrementar la conversión eficiente de energía eólica, minimizar los costos de fabricación y mantenimiento. Adicionalmente incrementar el desarrollo científico y tecnológico nacional, a las competencias globales por las que atraviesa la demanda energética mundial.

5



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



1.3 Objetivos

Alcance:

Se diseñara el eje de un aerogenerador de imanes permanentes con una capacidad de producción de energía eléctrica de 1.5 MW, para la región conocida como La Ventosa en el estado de Oaxaca, México.

El objetivo general:

Diseñar un eje para el aerogenerador de imanes permanentes con una capacidad de producción de energía eléctrica de 1.5 MW.

Objetivos particulares:

- Realizar un análisis bibliográfico relacionado con el diseño del eje.
- Diseñar el eje del aerogenerador utilizando la metodología de diseño QFD.
- Seleccionar los componentes del rotor eólico (pala-cubo).
- Seleccionar los componentes del sistema de frenado.
- Seleccionar los materiales para el eje.
- Realizar simulaciones estáticas y dinámicas en el programa ANSYS
- Obtener esfuerzos normales, cortantes, deformaciones máximas mediante la simulación en ANSYS.
- Analizar las frecuencias naturales del eje.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



1.4 Referencias

[1] BARLAS, T. "Closed-loop control wind tunnel tests on an adaptive wind turbine for load reduction".2008. *Journal of Physics: Conference Series 2007*.

[2] BEYENE, A. "A new turbine concept, the oceanic engineering society of the institute of electrical and electronic engineers".2006.*In: OCEANS 2006 ASIA conference/exhibition, May 16-19, Singapore.*

[3] MULLER, S. "Doubly fed induction generator system for wind turbines". 2002. *IEEE Industry Applications Magazine*. Vol.8, pp. 26-33.

[4] KAWAMURA, Testuya. "Application of the domain decomposition method to flow around the Savonius rotor". 2008. *In: Proceedings of the 12th International Conference on Domain Decomposition Method.* Chiba, Japan, 1998.

[5] SPERA, Da. "Editor Wind Turbine Technology". New York. *ASME Press.* 1994. JURECZKO, M. "Optimization of wind turbine blades".2005. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 167, 2005, pp. 463-471.

[6] BOUKHEZZAR, B. "Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization". 2006. *ASME Transactions: Journal of Solar Energy Engineering 2006*.Vol.128, 2006, pp. 30-516.

[7] DATTA, R y RANGANATHAN, VT. "A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system". 2003. *IEEE Transactions on Energy Conversion 2003*. Vol. 18, 2003, pp. 8-163.

[8] BUTTERFIELD, CP. "Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation". 2003. *IEEE Transactions on Industry Applications 2003*. Vol. 37, 2003, pp. 6-240.

[9] FLORI, I. "Advanced tools for modeling, design and optimization of wind turbine systems". 2004. *Proceeding of NORDIC wind power conference, Chalmers University of Technology*. Goteborg, Sweden. March 1-2, 2004.

[10]STEPHANIE, F. "Wind Power". New York: Chelsea House Publishers, 2010.

7





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

CAPITULO 2

CONCEPTOS GENERALES

2.1 Energía del viento

Los vientos ocurren por diferencias de presión generadas por un calentamiento no uniforme de la atmósfera terrestre, desplazándose grandes masas de aire de las zonas de alta presión a las de baja. Aproximadamente el 2% del calor del Sol que llega a la Tierra se convierte en viento, pero sólo una fracción muy pequeña puede ser aprovechada, ya que buena parte de estos vientos ocurre a grandes alturas o sobre los océanos, mar adentro. Además, se requieren condiciones de intensidad y regularidad en el régimen de vientos para poder aprovecharlos. Se considera que vientos con velocidades promedio entre 5.0 y 12.5 metros por segundo son los aprovechables. El viento contiene energía cinética (de las masas de aire en movimiento) que puede convertirse en energía mecánica o eléctrica por medio de aerogeneradores, los cuales se componen por un arreglo de palas, generador y torre, principalmente [1].

La circulación de las masas de aire se debe a la acción resultante de las fuerzas de rozamiento, de presión, gravitacional y de rotación de la Tierra, que inducen dos tipos de circulación del aire en la atmosfera:

- Circulación planetaria: debida a la incidencia de los rayos solares sobre la tierra y a la rotación de ésta, varía según la zona y la estación del año.
- Circulación a pequeña escala: la cual está determinada por la orografía del terreno, como las montañas y la presencia del mar.

8



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



2.2 Desarrollo Histórico

Las turbinas de viento han tenido una historia singular de las primeras máquinas desarrolladas por el hombre. El momento de su creación se ha perdido en el tiempo, pero su existencia como una maquina capaz de proveer energía mecánica ha sido comprobada durante mucho tiempo. Prueba de esto son las dos primeras máquinas que utilizaron la energía cinética de las fuentes naturales, el molino de viento y la rueda de agua, y que se desarrollaron principalmente en los siglos XVII y XVIII (ver Fig. 1). Pero con la aparición de las máquinas térmicas, su uso comenzó a decaer, ya que las nuevas máquinas, además de proveer más energía, eran más compactas, lo que les permitía adaptarse a diferentes usos.

Estas nuevas máquinas tenían la ventaja de que podían operar continuamente, sin depender de las variaciones que existían en la naturaleza, y podían ser colocadas en los lugares donde se necesitaran. Sin embrago, la turbina de viento sobrevivió a través de todo ese tiempo e incluso a la revolución industrial, aunque solo en regiones donde no se necesitaba un abastecimiento continuo de energía, ya que su principal uso fue el bombeo de agua y molienda de granos.

Las maquinas de viento fueron resucitadas por el surgimiento y proliferación de dos de las mayores tecnologías desarrolladas: el rápido crecimiento de la demanda eléctrica como un transductor versátil entre el generador de energía y el trabajo, y florecimiento de la ingeniería en la ciencia de aerodinámica, que fue ocasionada por el desarrollo del aeroplano. Para finales del siglo XIX, entre los años de 1888 y 1900, varios países, que no contaban con una reserva propia de petróleo, comenzaron a realizar experimentos en los cuales los molinos de viento fueron usados para generar electricidad.

Uno de los países que más ha desarrollado esta tecnología ha sido Dinamarca, la cual entre los años 1900 y 1910, instaló varias plantas generadoras de electricidad que utilizaban al viento como fuente de energía. Durante la Primera Guerra Mundial, el abastecimiento de petróleo fue nulo, por lo que la utilización de la energía del viento fue retomada. Muchas plantas generadoras de 20 a 35 KW fueron construidas en ese tiempo. Después de la primera guerra mundial, la electrificación se baso nuevamente en las maquinas térmicas, por lo que nuevamente, las turbinas de viento decayeron.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



En 1939, la Segunda Guerra Mundial, causó otro desabastecimiento de petróleo, por lo que otra vez, las turbinas de viento surgieron para satisfacer las necesidades energéticas. Al final de la guerra, la electrificación tomo un nuevo impulso, pero esta vez retomaron las el desarrollo de los aerogeneradores, se crearon programas de investigación que las consideraban como respaldo de las plantas generadoras más grandes.

Después de 1945, no solo Dinamarca contaba con estos desarrollos, también los tenían Francia, Alemania y Gran Bretaña. También se inspiraron desarrollos en Estados Unidos. Todas estas nuevas tecnologías trajeron éxito, pero no era suficiente en cuanto al costo que implicaba su desarrollo. Sin embargo, probaron ser un buen punto de partida para el renacimiento de las turbinas de viento en la década de los 70s, que fue provocada por la crisis petrolera de 1972.

Los términos que se han usado para denominar a los aerogeneradores son los de "molinos de viento" y "Turbinas de viento". La tecnología moderna ha establecido firmemente el segundo término, ya que la define como una máquina capaz de ser usada en cualquier número de diferentes aplicaciones, junto con otros elementos como son: transmisión mecánica, torre, generadores o bombas, cubiertas, etc. También, el término "Turbina de viento", es descrito como un Sistema de conversión de energía del viento, o si es usado para producir energía eléctrica, como Generador de turbina de viento [2].



Figura 1. Molinos de viento.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



2.3 Principio Funcional Básico de un Aerogenerador

Para transformar la energía del viento en electricidad, un aerogenerador capta la energía cinética del viento por medio del rotor aerodinámico y la transforma en energía mecánica que concentra sobre su eje de rotación o flecha principal. La energía mecánica se transmite a la flecha de un generador eléctrico.

Típicamente, el rotor aerodinámico está formado por un conjunto de dos o tres aspas. Por razones de diseño estructural y aerodinámico, para máquinas entre 200 y 3000 kW, la velocidad en el extremo del aspa se limita a valores entre 42 y 86 m/s (64 m/s en promedio). Esto se traduce en velocidades angulares comprendidas entre 19 y 65 rpm (34 rpm en promedio). Las velocidades nominales más bajas corresponden a los rotores de mayor diámetro, y por consecuencia, de mayor potencia. Por lo tanto, si se usan generadores eléctricos convencionales que operan a velocidades nominales altas (1200 – 1800 rpm) es necesario utilizar una caja de engranes para efectuar el acoplamiento.

Como cualquier sistema electromecánico, un aerogenerador tiene límites operativos que son función de las relaciones (eficiencia-resistencia-costo), que se especifican en su diseño. Por ello, es importante limitar su velocidad de rotación y su potencia de salida a niveles que no pongan en riesgo su integridad física.

Los aerogeneradores cuentan con dos o más subsistemas de seguridad enfocada a minimizar el riesgo de fallas que pudieran traducirse en daño a los seres humanos, así como a salvaguardar la integridad física del equipo. Todos los aerogeneradores para aplicaciones interconectadas cuentan con un sistema electrónico dedicado al control y a la adquisición de datos (SCADA). Independientemente que las máquinas formen parte de una central integrada con varias turbinas, cada aerogenerador cuenta con su propio control.

El chasis principal es una estructura metálica donde se monta el tren de potencia, el generador eléctrico, las mordazas del freno y, en su caso, las unidades hidráulicas. Recibe las cargas del rotor a través del tren motriz y las transmite a la torre vía el subsistema de orientación.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



En un aerogenerador de eje horizontal, tanto el rotor aerodinámico como el tren motriz y el generador eléctrico se instalan sobre una torre de altura considerable (40 a 60m). El objetivo de esto es tomar ventaja del incremento de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno, y por consecuencia, de su mayor contenido energético. La cantidad de energía capturable que se puede ganar con el incremento en altura depende del régimen de viento en el sitio y del tipo de terreno [3].

Los subsistemas principales con que se integra un aerogenerador de eje horizontal son (ver Fig. 2):

- Rotor (juego de aspas, cubo y nariz).
- Tren de potencia (flecha principal, caja de engranes y acoplamientos).
- Generador eléctrico.
- Subsistema de orientación al viento.
- Subsistema de regulación de potencia.
- Subsistema de seguridad (frenos).
- Chasis principal.
- Torre.

2.3.1 Rotor

El rotor es el subsistema formado por las aspas, el cubo y la nariz. Su función es convertir la energía cinética del viento en la energía mecánica que se utiliza para impulsar el generador eléctrico [4].

2.3.1.1 Aspas

La geometría de las aspas se diseña para que su desempeño sobre la gama de velocidades de viento de operación conduzca a extraer la mayor cantidad posible de la energía cinética del viento, atendiendo también a las limitaciones con relación a su construcción en términos económicos razonables [4].



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



2.3.1.2 Cubo

El cubo del rotor sirve para posicionar las aspas y es el elemento mediante el cual la potencia captada por el rotor se transmite a la flecha principal. El diseño de aerogeneradores de dos y tres aspas a dado lugar a los siguientes tipos de cubo:

- Rígido: para aerogeneradores de tres aspas, que consiste en una estructura metálica hueca que típicamente se construye con base en una fundición de acero nodular. En este caso, se diseña con una geometría que permite un acoplamiento firme de las aspas a través de pernos roscados o cuerdas metálicas embebidas en el material de las aspas. En su parte central interior está habilitado para acoplarse rígidamente con la flecha principal del aerogenerador.
- Basculante: para aerogeneradores de dos aspas, que se diseña con un grado de libertad alrededor de 2.5° con respecto al plano de rotación del rotor para reducir las cargas dinámicas [5].

2.3.1.3 Nariz

La nariz del rotor es una cubierta frontal en forma de cono que sirve para eliminar turbulencia indeseable en el centro frontal del rotor y mejorar el aspecto estético [4].

2.3.2 Caja de Engranes

En la selección o diseño de una caja de engranes para aerogeneradores se busca una relación óptima entre su capacidad de carga, su tamaño y su peso. Asimismo, se persigue obtener la más alta eficiencia y la menor emisión de ruido acústico.

Por su función, las cajas de engranes deben ser confiables y factibles de mantener. Uno de los problemas potenciales en este elemento es la falla de sus sellos. Usualmente, este problema se resuelve utilizando "sellos de laberinto" en las flechas de salida debido a que éstos son libres de mantenimiento. La lubricación en la caja de engranes de un aerogenerador se realiza por "salpicadura" y solamente se proveen medios para mantener la temperatura del lubricante dentro de los valores recomendados.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Durante mucho tiempo se utilizaron cajas de engranes del tipo "flechas paralelas" para integrar aerogeneradores, pero ahora hay una tendencia a utilizar las de tipo planetario porque son más compactas, pesan menos, emiten menos ruido y, en condiciones de carga parcial, tienen una eficiencia relativamente más alta.

Existe una nueva corriente de diseño que elimina la caja de engranes mediante la construcción de generadores eléctricos de baja velocidad nominal. En este caso, el rotor se acopla directamente al generador eléctrico; sin embargo, son de fabricación especializada y sus dimensiones son relativamente grandes [6].

2.3.3 Generadores Eléctricos

En la integración de aerogeneradores para aplicaciones interconectadas se utilizan tanto generadores eléctricos asíncronos como síncronos.

Los asíncronos típicamente son motores de inducción que se utilizan en forma inversa haciéndolos girar por encima de su velocidad de sincronismo. Cuando a un motor de inducción, conectado a la red eléctrica, se le hace girar por encima de su velocidad de sincronismo, mediante la aplicación de un par motriz rotatorio en su eje de rotación, la potencia mecánica aplicada se transforma en energía eléctrica.

Fundamentalmente, existen dos tipos de generadores asíncronos que se han utilizado para la integración de aerogeneradores: el "jaula de ardilla" y el de "rotor devanado". Los del primer tipo son los más utilizados debido a que:

- Su costo es bajo
- Requieren poco mantenimiento
- Son robustos
- Pueden conectarse directamente a la línea eléctrica a la que entregarán energía.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



2.3.4 Sistemas de Regulación de Potencia y Velocidad

Desde el punto de vista económico no es conveniente diseñar un aerogenerador que intente extraer la mayor cantidad de potencia disponible para las velocidades de viento muy altas, ya que aunque de éstas se puede producir la mayor potencia, energéticamente no representan una contribución muy significativa a lo largo del tiempo (debido a su baja frecuencia de ocurrencia). La excepción pueden ser lugares con regímenes de viento excelentes.

La velocidad nominal de diseño de un aerogenerador es función entre: el potencial de generación de electricidad, los costos de fabricación, mantenimiento, la resistencia y vida útil. A partir de la velocidad nominal se hace necesaria la regulación de la potencia de salida de los aerogeneradores, misma que ésta asociada al control de la velocidad de sus rotores aerodinámicos. La regulación de velocidad también atiende a una conveniencia técnica de limitar las cargas en el rotor para evitar el sobredimensionamiento del tren motriz y en general de la estructura del sistema [6].

2.3.4.1 Control por Angulo de Paso de las Aspas

Mecánicamente, el manejo del ángulo de paso de las aspas de un rotor consiste en hacerlas girar simultáneamente sobre su eje radial. Los mecanismos que actúan sobre la raíz de las aspas se encuentran ubicados dentro del cubo del rotor. La fuerza motriz para realizar el movimiento puede darse a través de mecanismos impulsados por dispositivos hidráulicos o eléctricos.

Los mecanismos actuados eléctricamente suelen se sistemas individuales montados en la raíz del aspa, los cuales operan en forma sincronizada, este tipo de sistemas están integrados para un motorreductor (en el cubo) acoplado a una corona en la base del aspa. Los mecanismos actuados hidráulicamente suelen ser centralizados y usualmente se montan sobre el chasis principal. Su actuación modifica simultáneamente el paso de todas las aspas [7].



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



2.3.5 Sistemas de Orientación

Existen dos posibilidades para la orientación de un rotor de eje horizontal con relación a la dirección del viento.

En la configuración "viento arriba", el viento pasa primero sobre el rotor y después sobre la torre del aerogenerador.

En la configuración "viento abajo", el viento pasa primero sobre la torre y después sobre el rotor. Son pocos los diseños con rotores viento abajo, ya que el paso de una aspa por la "sombra eólica" de la torre crea esfuerzos adicionales de magnitud considerable sobre la flecha del rotor, este problema es mayor para rotores de dos aspas [7].

2.3.6 Sistemas de Seguridad

Los sistemas de seguridad tienen como propósito principal proteger la integridad física de los humanos, así como la del equipo en si conjunto. Por ello, tales sistemas llevan a los aerogeneradores a una condición estable y segura en situaciones como:

- Presencia de vientos superiores a la velocidad de salida.
- Velocidad de rotación por arriba del máximo aceptable.
- Pérdida de carga
- Exceso de vibraciones.
- Temperaturas por arriba de las máximas aceptables.
- Pérdida de presión en controladores hidráulicos.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Dado que la fuente de energía no es controlable, ante una situación operativa anómala la acción típica de seguridad es el paro forzado de los aerogeneradores. Los paros forzados se pueden dar en los siguientes esquemas:

- A través del controlador electrónico local.
- Por acción directa de elementos específicos.
- Por voluntad de los operadores.

Los medios principales que se utilizan para efectuar el paro forzado son:

- Freno de disco
- Control del ángulo de paso de las aspas
- Dispositivos de punta de aspa
- Control de orientación del viento.

2.3.6.1 Controladores Electrónicos Locales

Todos los aerogeneradores para aplicaciones interconectadas cuentan con un sistema electrónico dedicado al control y a la adquisición de datos (SCADA) [6].

Los SCADA están basados en microprocesadores(microcontroladores), estos pueden ser sistemas electrónicos de aplicación específica, o bien, estar integrados a base de controladores lógicos programables (PLCs),sus funciones principales son:

- Controlar los procesos de inicio de operación y de conexión a la red.
- Controlar la regulación de velocidad y potencia de salida.
- Controlar la orientación del rotor con relación a la dirección del viento.
- Controlar los procesos de paro forzado.
- Controlar los elementos auxiliares para mantener el sistema en las mejores condiciones de operación normal.
- Ser la interfaz hombre-maquina a nivel local.
- Adquirir y procesar los datos del comportamiento operacional de cada turbina.
- Ser el medio de comunicación entre la unidad y los centros de supervisión en centrales eoloeléctricas.

17



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Para tales fines, los SCADA miden y detectan, por medio de transductores, una considerable cantidad de variables, entre las que se encuentran:

- Velocidad y dirección del viento.
- Velocidades angulares.
- Temperaturas de elementos críticos.
- Niveles de presión de aceite.
- Angulo de orientación
- Vibraciones
- Estados operativos
- Parámetros electrónicos.

2.3.7 Chasis Principal

El chasis principal es la estructura sobre la cual se montan los principales componentes de un aerogenerador (rotor, tren motriz, generador eléctrico y servomotores). Este componente recibe un gran número de cargas impuestas sobre los elementos del sistema y las transmite a la torre.

El chasis es una estructura metálica construida a base de lámina de acero y perfiles estructurales soldados. Es el principal receptor de los esfuerzos generados en el evento de frenado, ya que sobre él se montan los elementos de fricción que actúan sobre el disco. Su dimensión y peso depende de las cargas que debe soportar, mismas que son de magnitud considerable [4].





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

2.3.8 Torres

Las torres que se utilizan para instalar aerogeneradores de eje horizontal pueden ser tubulares y de celosía [4].

Torres tubulares

Ventajas:

- Proporcionan el medio de protección e instalación para equipos de control y sistemas eléctricos en piso.
- Se pueden integrar medios muy seguros para que el personal de mantenimiento suba al chasis.
- Su comportamiento dinámico es relativamente sencillo.
- Su aspecto estético es agradable y moderno.
- Su instalación es fácil y rápida.
- Requieren menos mantenimiento.
- Su base ocupa poco espacio.

Desventajas:

- Tienen un costo relativamente alto.
- Su fabricación requiere maquinaria especializada.
- Su transportación es más difícil y costosa.

Torres de celosía

Ventajas:

- Tienen un costo relativamente bajo.
- Son fáciles de construir ya que típicamente están formadas por perfiles angulares de acero.
- Son fáciles de transportar, prácticamente en cualquier tamaño.

19



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Desventajas:

- Requieren mucho mantenimiento
- Son rígidas
- Requieren de un medio adicional para la instalación del equipo electrónico de piso.
- El acceso al chasis principal implica riesgos altos en condiciones climáticas adversas.



Figura 2. Elementos que integran un aerogenerador de eje horizontal.

20



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



2.4 Clasificación de los aerogeneradores

Las aerogeneradores pueden ser clasificadas, por la posición de su eje, en horizontales y verticales. Por su aplicación los aerogeneradores se pueden clasificar en:

Aerogeneradores para aplicaciones aisladas: son máquinas pequeñas que se utilizan para alimentar cargas que están alejadas de las redes eléctricas convencionales. Típicamente, se combinan con bancos de baterías para almacenar la electricidad que generan y poder acoplar en el tiempo la generación con la demanda. Con frecuencia, este tipo de aerogenerador se combina con generadores diesel que hacen una función de respaldo y, dependiendo de las necesidades de suministro de electricidad y de la disponibilidad de los recursos energéticos no convencionales, se pueden combinar con sistemas fotovoltaicos, microturbinas hidráulicas y otros, dando lugar a las combinaciones que se conocen como "sistemas híbridos".

Aerogeneradores para aplicaciones interconectadas: son máquinas de tamaño considerable que típicamente se interconectan con una red eléctrica convencional para contribuir a la alimentación de cargas especificas de capacidad importante o para construir centrales eoloeléctricas.

En el proceso de desarrollo tecnológico de aerogeneradores para aplicaciones interconectadas se han propuesto y aprobado una gran variedad de conceptos. Sin embargo, los aerogeneradores de eje horizontal, son los únicos que han alcanzado un grado de madurez aceptable tanto en lo técnico como en lo económico, en estas máquinas, el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento.

Como una corriente de diseño diferente se intentó el desarrollo de máquinas de eje vertical o tipo Darrieus. Estas no han prosperado de manera significativa [3].







Con base en le concepto de aerogenerador de eje horizontal, se desarrolló una amplia variedad de modelos que ahora se ofrecen comercialmente. Algunas de las diferencias entre ellos son:

- Tipo de subsistema que se utiliza para la conversión mecánico-eléctrica.
- Métodos para controlar la velocidad de rotación en operación normal.
- Número y características de las aspas con que se construye el rotor.
- Subsistema utilizado para incrementar la eficiencia y la confiabilidad de la máquina.
- Métodos, elementos y subsistemas que se usan para suavizar la conexión a la red eléctrica y mejorar la calidad de la energía generada.
- Métodos y elementos que se utilizan para reducir efectos que limitan su aceptación pública.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



2.5 Energía Eólica Panorama Mundial

A partir de las leyes establecidas para promover alternativas al petróleo en los Estados Unidos como resultado de la crisis de 1973, en el estado de California se presentó un fenómeno particular, que fue la aparición de las granjas eólicas. Bajo este esquema, para 1994 California tenía más de 15 000 turbinas eólicas instaladas que generaban la energía equivalente a la consumida por todos los habitantes de la ciudad de San Francisco en un año.

La experiencia positiva de California desencadenó una ola de desarrollo que llevó a otros estados de la Unión Americana y a otros países a aprovechar las oportunidades de esta tecnología. Actualmente existen varios proyectos en construcción en los estados de Colorado, Iowa, Minnesota, Nebraska, Kansas, New México, Oregón, Texas, Wisconsin y Wyoming. Todo indica que estos desarrollos elevarán la capacidad eólica de los EU en 50%, lo suficiente para potenciar más de medio millón de hogares americanos. A comienzos del año 2001 se tenían instalados cerca de 2 800 MW eólicos en Estados Unidos. Asimismo, al iniciar el presente año se contaba con alrededor de 18,500 MW eólicos en todo el mundo.

En Europa resalta el dinamismo que presenta la península ibérica, donde el mercado de las energías renovables se ha colocado entre los más importantes de Europa, justo detrás de Alemania y Dinamarca. Esto ha ocurrido, en buena medida, como resultado de una agresiva estrategia gubernamental de fomento de alternativas al petróleo y ha resultado en un crecimiento exponencial, duplicándose la capacidad instalada cada año. De esta manera, de una potencia eólica instalada en 1996 de 216 MW, se alcanzó una capacidad acumulada de 2,900 MW para 2004. Resalta, en particular, la provincia española de Navarra, la cual posee la industria eólica de más rápido crecimiento en el mundo ya que, partiendo de cero capacidad de este tipo, pasó a obtener 23% de su electricidad del viento en menos de tres años.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Todo lo anterior ha causado disminuciones significativas en el costo de la tecnología y de la energía generada por este medio. Ejemplo de esto es la reducción de costos de 50% entre 1992-97. Actualmente los costos promedio de la energía eléctrica generada a partir del viento se ubican entre 4 y 8 centavos de dólar por kWh generado, los cuales ya están muy cerca de los 2.5 centavos de dólar por kWh que actualmente cuesta la generación convencional mediante tecnología de punta [8].

2.6 Energía Eólica Panorama en México

En México, existen actividades tendientes al aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones desde hace varias décadas, aunque es particularmente significativo el avance e interés de instituciones e industrias en las últimas tres, periodo en el que se han desarrollado investigaciones y diversos proyectos, prototipos, equipos y sistemas para el mejor aprovechamiento de las energías renovables.

Se estima que el potencial eoloeléctrico técnicamente aprovechable de México alcanza los 5,000 MW, lo que equivale a 14% de la capacidad total de generación eléctrica instalada actualmente. Este potencial tiene ahora mayores posibilidades de desarrollarse, por la disminución de sus costos que han llegado a ser casi competitivos con las energías convencionales y por las modificaciones a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su Reglamento. En este sentido, resaltan los potenciales identificados en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, en la parte correspondiente a la costa del Pacífico. Se han identificado también sitios en los estados de Baja California, Coahuila, Hidalgo, Quintana Roo y Zacatecas.

En nuestro país existe desarrollo tecnológico importante en relación con la generación de electricidad a partir del viento. En particular, resalta el trabajo del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), con más de 20 años de experiencia en el tema.




Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

En el sector privado, destaca la capacidad de diseño y manufactura nacionales de este tipo de equipos desarrollados por una empresa que los exporta ensamblados en el Distrito Federal.

Por su parte, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a partir del conocimiento y de la experiencia desarrollada en el IIE construyó y opera dos plantas eólicas piloto, con el objetivo de adentrarse en esta tecnología y validar su integración al Sistema Eléctrico Nacional. En agosto de 1994, la CFE puso en operación una central eoloeléctrica de 1.5 MW de capacidad en La Venta, Oaxaca (ver Fig. 3). En diciembre de 1998, entró en operación la central eólica Guerrero Negro que se ubica en la península de Baja California Sur y tiene una capacidad de 600 kW.

Asimismo, en algunos estados de la República tales como Chihuahua y Sonora, se utilizan sistemas eólicos para bombeo de agua denominados aerobombas, muy útiles en localidades rurales aisladas de la red de suministro, o cuyas condiciones geográficas impiden la electrificación convencional. Finalmente, y desarrolladas con capital privado, se tienen 5 permisos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE), para instalar 148 MW a partir de energía eólica [8].



Figura3. Parque Eólico "La Venta". Oaxaca, México.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

2.7 Referencias

[1] HEIER, S. "Grid Integration of Wind Energy Conversion System". 1998. *John Wiley and Sons*. Chichester, Sussex (UK), 1998.

[2] JOHNSON, G.L. "Wind Energy Systems".1985. *Prentice – Hall*. 1985. Englewood Cliffs, NJ (US), 1985.

[3] VAS, P. "Vector Control of AC Machines".1990.*Oxford Clarendon Press*. NY (US), 1990.

[4] VAS, P. "Sensorless Vector and Direct Torque Control". 1998. Oxford University Press. NY (US), 1998.

[5] TARTER, R.E. "Solid- State Power Conversion Handbook".1993. *John Wiley and Sons, Inc*.1993.

[6] BOSE, B.K. "Power Electronics and Variable Frequency Drives". 1997. IEEE Press, 1997.

[7] HOGG, P. "Manufacturing Challenges for Wind Turbines". 2008. *Nosthwest Composites Centre*. Manchester (UK), 2008.

[8] Conferencia Magistral "Las Energías Renovables en México y el Mundo". 2005. Distrito Federal, México, 2005.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DEL PROYECTO "QFD"

3.1 Introducción

La importancia de la calidad en la industria está en estos momentos fuera de discusión. En la actualidad, la supervivencia en el mercado de cualquier producto depende en gran medida de su capacidad de dar servicio de modo que el usuario perciba que sus necesidades son satisfechas adecuadamente. Otros factores de importancia, como la competencia creciente, el desarrollo tecnológico y sofisticación de buena parte de las funciones requeridas o incluso la toma de conciencia del consumidor demandando productos más respetuosos con el medio ambiente, requieren un enfoque de diseño capaz de integrar todas estas influencias e incorporarlas al proceso desde su inicio [1].

Existen por tanto necesidades de calidad centradas en la mejora de las características del producto, pero también otros aspectos relacionados con el control de los procesos. Para ambos objetivos se han desarrollado desde hace décadas numerosas técnicas (con especial énfasis a partir de los años 80, aunque algunas de ellas datan incluso de principios del siglo XX). Algunas de las más importantes son:

- Herramientas estadísticas: Diagramas de Pareto, Diagramas de dispersión, Gráficos de Control de Calidad.
- Despliegue de la Función de Calidad (QFD).
- Diagramas Causa Efecto.
- Árboles de Fallos.
- Análisis de Fallos y Efectos (AMFE).

Por su enfoque integrado y su especial énfasis en los aspectos del diseño, se ha optado por tomar QFD como herramienta de aplicación en el diseño conceptual.

27



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



3.2 Despliegue de la función de calidad (Quality Function Deployment – QFD)

La metodología Despliegue de la Función de Calidad fue desarrollada en la década de los 60 en Japón por Mizuno y Akao (1994), su expansión al resto de países industrializados no llegaría hasta dos décadas después. QFD puede definirse como un proceso metodológico que tiene como finalidad traducir las necesidades de los usuarios en información técnica a lo largo de todo el proceso de diseño. Para ello, la herramienta fundamental empleada es un conjunto de matrices que interconectan información de usuario con diferentes especificaciones en diferentes fases (ver Fig. 4).



Figura 4. Secuencia de matrices de QFD

La metodología cubre todas las fases del proceso de diseño, desde la generación del concepto de producto hasta su fabricación y puesta en el mercado. Las matrices están conectadas de modo que la información sintetizada en una matriz previa alimenta el análisis de la siguiente. De este modo, las necesidades de los usuarios, constituyen la entrada fundamental de información en la primera matriz, marcan las características del proceso en todas sus fases, logrando así centrar el diseño en el usuario.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Las matrices del QFD son denominadas "Casa de la Calidad", por su parecido a la estructura de una casa. Para el diseño conceptual se emplea únicamente esta primera, que combina información de los usuarios desde su propia óptica (lo que se ha dado en llamar " la voz del usuario"), información de la competencia analizada también desde el punto de vista del usuario e información técnica del producto en forma de parámetros técnicos.

El QFD ayuda al equipo de diseño a situar al usuario como el elemento principal del proceso y adaptar las capacidades de la empresa a este objetivo central, en lugar de fabricar productos basados exclusivamente en tendencias de mercado o en características que tradicionalmente la empresa ha venido incorporando bajo su propio criterio. Como consecuencia directa, los costos futuros por errores en el diseño se reducen notablemente.

El objetivo básico de la Casa de la Calidad es traducir las demandas de usuario, comúnmente formuladas en términos genéricos y subjetivos excesivamente ambiguos, a términos de ingeniería, en forma de especificaciones técnicas cuantificadas y definidas inequívocamente. La Casa de la Calidad puede entenderse como una "caja negra" en la que se introduce de entrada información de usuario, y se obtiene como salida información sobre especificaciones técnicas (ver Fig. 5).



Figura 5. La casa de la calidad como caja negra.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



3.3 Estudio del usuario

3.3.1 Lista de demandas de usuario

El primer paso en la aplicación de la metodología QFD para el diseño de un producto consiste en identificar las demandas de usuario. De acuerdo con Terninko [1], una adecuada identificación de las necesidades de usuario es clave para el éxito del diseño. Por ello, en esta primera fase el papel del ingeniero debe limitarse a escuchar la voz del usuario.

Demandas del usuario:

- Que sea fácil de operar
- Que se ajuste por igual en todos los lados, que quede a la misma distancia de todas las piezas
- Que no manche con la grasa de los mecanismos
- Que se limpie fácilmente
- Que sea atractivo, que no de imagen de mala calidad
- Que el material no pierda color
- Que gire aunque se tenga poco viento
- Que no haga ruido
- Que no rebote cuando gire
- Que no entre agua aunque llueva
- Que se detenga cuando se requiera





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

- Que cuando se de mantenimiento no gire
- Que no se oigan los ruidos exteriores
- Que no se oiga el ruido del viento en marcha
- Que no gotee agua o nieve cuando gire
- Que gire con facilidad
- Que se ajuste bien al resto del aerogenerador
- Que sea fácil mantenerlo limpio
- Que transmita imagen de calidad
- Que permita detenerse fácilmente
- Que aislé bien del exterior
- Que su funcionamiento sea bueno
- Que tenga una buena apariencia

3.3.2Estructuración de las demandas

El siguiente paso en el proceso de diseño es agrupar las demandas.

Se tienen 23 demandas del usuario, el siguiente objetivo será agruparlas de modo que se identifiquen los "temas" a los que se refiere cada grupo de demandas [2]. Para ello se emplea la técnica de los Diagramas de Afinidad, creando agrupaciones naturales entre elementos (primarias – secundarias – terciarias), (ver Fig. 6).





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación







Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Figura 6. Agrupación de las demandas (primarias-secundarias-terciarias)



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



3.4 Priorización de las demandas

Una vez identificado, estructurado y clasificado las demandas, el siguiente paso consiste en asignar un valor numérico que de alguna forma valore la importancia de la demanda para el usuario [3]. Se emplea la técnica de Árbol de Priorización, con distribución de cien puntos (ver Fig.7).

		Que sea fácil de operar $(30\%) \longrightarrow 8.4$
	Que gire con facilidad	Que gire aunque se tenga poco viento
		(10%) → 2.8
	(40 %)	Que no rebote cuando gire (30 %) 8.4
		Que no haga ruido (30 %) 8.4
Que su		
funcionamiento		Que no entre agua aunque llueva (30%)→ 6.3
sea bueno	Que aislé bien del exterior	Que no se oiga el ruido del viento en marcha
(70%)	(30%)	(10%) 2.1
		Que no gotee agua o nieve cuando gire
		(30%) → 6.3
		Que no se oigan los ruidos exteriores
		(30%) 6.3
	Que permita detenerse	Que se detenga cuando se requiera (60%) ≯12.6
	fácilmente (30%)	Que cuando se de mantenimiento no gire
		(40%) → 8.4

34





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

	Que transmita imagen	Que el material no pierda color (60 %) \longrightarrow 3.6
	calidad (20%)	Que sea atractivo, que no de imagen de mala calidad
Que tenga		(40 %) → 2.4
una buena	Que sea fácil mantener	Que se limpie fácilmente (60 %)
apariencia	1impio (50%)	Que no manche con la grasa de los mecanismos
(30 %)		(40%) → 6
	Que se ajuste bien al	Que se ajuste por igual en todos los lados,
	resto del aerogenerador	que quede a la misma distancia de todas las piezas
	(30 %)	(100%) 9
100%	100%	100%

100%

Figura 7. Priorización de demandas.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



3.4.1 Introducción de las demandas en la casa de la calidad

Se ha alcanzado un nivel suficiente de compresión de las demandas, y es posible introducir en la Casa de la Calidad esta información. La parte izquierda de ésta (ver Fig.8), contendrá el listado de las demandas terciarias. En la columna inmediatamente contigua se incluirá la importancia (calculada en la priorización de las demandas) (ver Fig.9).



Figura 8.Introducción de las demandas en la Casa de la Calidad.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Introduciendo las demandas en la Casa de la Calidad:

Demandas	Importancia	
Que sea fácil de operar	8.4	А
Que gire aunque se tenga poco viento	2.8	В
Que no rebote cuando gire	8.4	С
Que no haga ruido	8.4	D
Que no entre agua aunque llueva	6.3	Е
Que no se oiga el ruido del viento en marcha	2.1	F
Que no gotee agua o nieve cuando gire	6.3	G
Que no se oigan los ruidos exteriores	6.3	Н
Que se detenga cuando se requiera	12.6	Ι
Que cuando se de mantenimiento no gire	8.4	J
Que el material no pierda color	3.6	K
Que sea atractivo, que no de imagen de	2.4	L
mala calidad		
Que se limpie fácilmente	9	М
Que no manche con la grasa de los	6	N
mecanismos		
Que se ajuste por igual en todos los lados,	9	0
que quede a la misma distancia de todas		
las piezas		

Figura 9.Demandas en la Casa de la Calidad.

Los números denotan el grado de importancia, desde 2.4 para el de menor importancia, hasta 12.6, para el de mayor importancia.

3.5 Estudio comparativo con productos de la competencia

Actualmente, en el mercado existe una gran variedad de Sistema de Transmisiones para los aerogeneradores de imanes permanentes, pero cada uno de ellos ha sido diseñado para un propósito en específico y no cubren nuestros requerimientos de: torque, factor de seguridad, vida útil del sistema, costo, mantenimiento, etc., por lo tanto un estudio comparativo con marcas o modelos específicos no aplica.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



3.6 Traducción de los requerimientos del cliente en términos mensurables de ingeniería

La tabla siguiente es el resultado de la traducción de los requerimientos deseables por medio de diagramas de bloque [4].

Tabla A. Traducción de los requerimientos del cliente en Términos mensurables de ingeniería.

Requerimientos del Cliente	Traducción	Unidad de medida
Que sea resistente	ALTO	m
	ANCHO	m
	EXPOSICIÓN AL MEDIO	Tiempo
	AMBIENTE	
	DISEÑO POR	Factor de seguridad
	RESISTENCIA	
Ligero	MÍNIMA LONGITUD	m
	MÍNIMO DIAMETRO	m
	MATERIALES LIGEROS	Kg
Mantenimiento Fácil y	No. DE PIEZAS DE	Cantidad
económico ENSAMBLAJE		
	COSTO ACCESIBLE	\$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



3.7 Establecimiento de las metas de diseño

Cada meta de diseño debe expresar una característica mensurable que debe tener el producto [5].

	META
Dimensiones máximas	6 m largo, diámetro menor 1.5 m
Costo	No mayor 70 000 dls
Velocidad máxima	20 RPM
Tipo de tornillería	Estandarizada
Diseñar elementos por resistencia	Usar factor de seguridad 2.
Procesos de manufactura	Torno, Fresa, Taladro.
Usar materiales ligeros	Peso máximo del sistema 30 000 kg
Usar el mínimo número de piezas de	1
acoplamiento	
Resistencia a la oxidación	Que resista condiciones de humedad

Tabla B. Establecimiento de la metas de diseño.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



3.8 Referencias

[1] TERNINKO, J.Step-by-Step QFD: Costumer Driven Product Desing. CRC.1997.

[2] MEARS, P. Quality Improvement Tools and Techiniques. Mc Graw Hill. 1994.

[3] HAUSTER, R. The House Of Quality. Harvard Business. 199.

[4] KANO, N. *Attractive quality an must be quality*. The Journal of the Japanese Sosiety For Quality Control. 1998.

[5] MIZUNO, S. QFD. Asian Productivity Organization. 1994.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DIRECTA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis del viento, pala, cubo y generador de imanes permanentes.

4.1.1 Análisis del viento

Se analizaron datos del viento de la zona conocida como la Ventosa, en el estado de Oaxaca, México. Los datos son recopilados de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional [1], con un historial del año 2003 a 2009(con intervalos de 10 minutos por día). En la tabla 1, se muestra el promedio por mes de la velocidad del viento relativo, velocidad de las ráfagas de viento y la temperatura.

2003-2009		WSK	WSMK	AvgTemp	WSK	WSMK
		km/h	km/h	¬C	m/s	m/s
MES						
ENERO		12.6770909	22.2707273	21.0469091	3.52778	6.1222
FEBRERO		11.0714818	19.3858777	23.2116609	3.05555	5.3833
MARZO		13.1258866	23.419607	25.5247572	3.64	6.5
ABRIL		13.051531	22.8302397	26.5128412	3.6111	6.34167
MAYO		12.3189651	21.6403921	28.84739	3.419	6.0111
JUNIO		9.45471488	16.3685206	26.9354561	2.611	4.5444
JULIO		9.77204844	16.8599647	26.1399194	2.69	4.6805
AGOSTO		8.58227325	14.7453272	26.1931343	2.38	4.095
SEPTIEMBRE		6.97580478	12.1805036	26.4226116	1.91	3.333
OCTUBRE		8.18325313	14.4433109	24.9708614	2.25	4.0111
NOVIEMBRE		12.3140486	21.6525768	23.005005	3.419	6.01389
DICIEMBRE		11.7584727	20.8094442	20.1281744	3.2662	5.78
	PROMEDIO	10.7737976	18.8838743	24.91156	2.98163583	5.23468

Tabla 1. Promedio de la velocidad del viento (2003 – 2009)

Donde:

WSK: Velocidad del viento relativo

WSMK: Velocidad de la ráfaga de viento

Avg Temp: Temperatura (°C)

41



La figura 12, muestra la Velocidad relativa del viento respecto a los meses del período 2003 a 2009.



Figura 12. Velocidad relativa - Meses del período 2003 a 2009.

La figura 13, muestra la Velocidad de las ráfagas del viento respecto a los meses del período 2003 a 2009.



Figura 13. Velocidad de las ráfagas - Meses del período 2003 a 2009







Se puede apreciar de la tabla X, que el promedio del viento relativo es de 2.98 m/s al año, y el promedio de las ráfagas de viento es de 5.23 m/s. La ráfaga de viento de mayor magnitud registrada es de 50 m/s, en el año 2004. Por lo que se requiere una pala que trabaje a una velocidad de viento mayor a 2 m/s.

4.1.2 Pala

Para la generación de energía eléctrica en un aerogenerador de imanes permanentes de 1.5 MW, se requiere una pala que cumpla con el Estándar Internacional IEC 6 1400-1 [2] y la regularización Alemana GL [3].

Bang, Kong y Sugiyama (2004) realizaron el diseño estructural de la pala de un aerogenerador de eje horizontal para una producción de 750 KW. La pala fue fabricada de fibra de vidrio y resina epoxy; cuenta con el código NACA 63 - 218 airfoil. El diseño de la pala fue determinado por las especificaciones IEC y GL. Jureczko, Mezyk y Pawlak (2005) realizaron la optimización de la pala para una producción de 1.5 a 1.8 MW. La pala optimizada tiene el código NACA 63 – 212 airfoil.

Por lo que en el presente trabajo, se utilizan los resultados obtenidos de los análisis realizados en la pala con código NACA 63 - 212 y NACA 63 - 218 airfoil, ya que no se cuenta con la información de una pala en especifico.(ver Fig.14 y 15).



Figura 14. Pala NACA 63 – 212 dibujada en ANSYS.



Figura 15. Pala Seccionada NACA 63 – 218.

La pala presenta especificaciones técnicas, como se puede ver en la tabla 2:

Tabla 2. Especificaciones	s Técnicas de la pala NACA 63-212.
---------------------------	------------------------------------

Longitud de la pala (m)	45
Cuerda máxima (m)	3.6
Angulo de torsión total (grados)	12
Máxima velocidad en la punta (m/s)	90
Velocidad de viento de corte (m/s)	22
Rango de temperatura de operación (°C)	-20 a +50
Diámetro de empotramiento (m)	2.2
Masa aproximada (kg) por pala	6 700
Material	Fibra de vidrio / Resina Epoxy
Par de Torsión por sistema de 3 palas	35 400 KN*m



Jureczko, Mezyk y Pawlak (2005), realizaron un Análisis Modal (ver Fig. 16), en la tabla 2 se muestran las frecuencias naturales obtenidas en la pala:



Figura 16. Segundo modo de la pala, frecuencia 1.8459 Hz. Tabla 3. Frecuencias Naturales de la pala NACA 63 – 212.

No. Modo	Frecuencia (Hz)
1	0.79534
2	1.8459
3	2.2756
4	4.5224
5	6.5686
6	7.839
7	11.982
8	15.882
9	16.414
10	17.947



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



La tabla 4, muestra 3 modos de vibración en pala respecto a velocidad máxima 25 rpm.

Modo	Frecuencia (Hz)
1	1.14
2	2.23
3	3.16

 Tabla 4. 3 modos de vibración en la pala a velocidad máxima de 25 rpm.

4.1.3 Cubo

Para la unión de las palas al eje, se necesita un elemento de acoplamiento llamado "Cubo". Para aerogeneradores de tres aspas, consiste en una estructura metálica hueca que típicamente se construye con base en una fundición de acero nodular.

En este caso, se empleara un Cubo de la Compañía VESTAS (ver Fig.17), que cuenta con una geometría que permite un acoplamiento firme de las palas. En su parte central interior está habilitado para acoplarse rígidamente con el eje del aerogenerador [6].

En la tabla 5, muestra características principales del Cubo.

Diámetro de empotramiento - palas	2.2 m
Diámetro de acoplamiento entre eje	0.8 – 1.3 m
Largo	4.2 m
Ancho	4 m
Masa Aproximada (Kg)	18 000
Geometría para freno aerodinámico	si

Tabal 5. Características del Cubo.

46





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Figura 17. Cubo de Aerogenerador VESTAS con freno aerodinámico.

4.1.4 Generador de imanes permanentes

Para la producción de energía en el aerogenerador, se requiere un generador eléctrico de imanes permanentes de flujo radial síncrono. El generador eléctrico tiene una configuración FRPMM (90 ranuras – 120 polos) trifásico (ver fig.18).

En esta configuración, el estator contiene 90 ranuras donde se colocan las bobinas de cobre, el rotor sostiene una corona de 120 imanes permanentes de Neodimio "NdFeB" (ver fig.19), y es montado en el sistema de transmisión directa [7].



Figura 18. Generador eléctrico tipo: FRPMM.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



En la tabla 6, muestra características del generador eléctrico de imanes permanentes.

Capacidad de generación	1.5 a 1.8 MW
Refrigeración	Refrigerado por aire y agua
Voltaje	690 V +/- 10% , 50 o 60 Hz
Velocidad de operación	2 a 25 rpm
Velocidad máxima de operación	30 rpm
Rango de temperatura	-28 C + 40 C
Diámetro exterior /estator	5.1 m +/- 0.01 m
Diámetro exterior/ rotor	4.8 m +/- 0.01m
Compañía	GOLDWIND - ABB
Masa aproximada (Kg) Rotor/sin imanes	9 305.8

Tabla 6. Características del generador eléctrico.

Dimensiones del generador eléctrico:

A: 1.95 m B: 0.0254 m C: 0.20 m D: 0.90 m E: diámetro 0.98m F: diámetro 1.05 m G: diámetro 4.80 m H: 0.0254 m I: 0.0762 m



Instituto Politécnico Nacional



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación







Figura 19. Rotor de imanes permanentes acotada (m).



Figura 20. Estator de imanes permanentes sin imanes.

En la tabla 7, muestra características del imán permanente de Neodimio.

Densidad (g/cm3)	7.5
Máxima Temperatura de Operación	150 C
Máxima Cuire Temperatura	350 C
Coeficiente de Temperatura	-0.07 %/C
Masa aproximada de la corona con 120	17 328
imanes permanentes (Kg)	

Fabla 7.	Características	del imán	de	Neodimio.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Dimensiones del imán de Neodimio:

A: 0.12 m, radio: 2.4 m B: 0.118 m, radio: 2.3 m C: 0.20 m D: 0.80 m



Figura 21. Vista frontal, Imán de Neodimio.



Figura 22. Vista Lateral Imán de Neodimio.



Instituto Politécnico Nacional



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Figura 23. Corona de imanes permanentes.



Figura 24. Estator de imanes permanentes con imanes.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



4.3 Análisis de cargas en el sistema de transmisión directa.

En el sistema de transmisión directa se le acoplaran elementos como el Rotor de imanes permanentes, los cojinetes que lo soportan, el cubo y las palas. La figura 25, muestra una configuración axial de los elementos sobre el Sistema de transmisión directa.



Figura 25. Configuración de los elementos que se acoplan al Sistema de transmisión.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



En la configuración de la figura anterior, se propone un dimensionamiento axial, tomando como referencia las dimensiones que presentan los elementos de acoplamiento. Teniendo como referencia la configuración anterior de los elementos de acoplamiento, en la figura 26 se realiza un diagrama de cuerpo libre indicando las distintas cargas que intervienen en el sistema de transmisión directa, en los puntos B a L de la figura anterior.



Figura 26. Diagrama de cuerpo libre del sistema de transmisión directa.

Donde:

W1: representa la fuerza ejercida por el peso del rotor de imanes permanentes con imanes.

W2: representa la fuerza ejercida por el peso del cubo y las palas.

T1: representa el par de torsión generado por el rotor de imanes permanentes.

T2: representa el par de torsión generador por el cubo - palas.

 W_1^T : representa la fuerza tangencial de W1.

 W_2^T : representa la fuerza tangencial en W2.

F: es la reacción de las palas sobre la longitud del sistema de transmisión.

B: es la ubicación del cojinete 1.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

E: es la ubicación del rotor de imanes permanentes.

H: es la ubicación del cojinete 2.

L: es la ubicación del cubo – palas.

RBZ: reacción de B en la dirección z.

RBY: reacción de B en la dirección y.

RHZ: reacción de H en la dirección z.

RHY: reacción de H en la dirección y.

Para el presente trabajo, no se toma en consideración la Reacción de las palas a lo largo del Sistema de transmisión, debido a que no se cuenta con la magnitud de la fuerza. Por lo que se trabaja con el par de torsión de las palas, y su peso.

Calculo de las reacciones RHY, RBY:

$$+ \sum F_{y} = 0;$$

$$R_{By} - W_{1} - W_{2} + R_{Hy} = 0$$

$$R_{By} - 261,277.58N - 373,761N + R_{Hy} = 0 \qquad ec \quad (1)$$

 $+ \bigstar \sum M_z = 0;$

$$-W_1(1.5m) - W_2(3.7548m) + R_{Hy}(3m) = 0$$

$$R_{Hy} = 598,438.1N$$

Sustitución de R_{Hy} en ec (1)

 $R_{By} - 635,038.58N + 598,438.1N = 0$ $R_{By} - 36,600.48N = 0$ $R_{By} = 36,600.48N$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Calculo de las reacciones RHZ, RBZ:

+ ★∑
$$F_z = 0$$
;
+ $R_{Bz} - W_1^T + R_{Hz} + W_2^T = 0$
+ $R_{Bz} - 14,750KN + R_{Hz} + 753.19KN = 0$
+ $R_{Bz} + R_{Hz} - 13,996.81KN = 0$ (1.1)

+↓∑
$$M_y = 0$$
;
+ $W_1^T (1.5m) - R_{Hz} (3m) - W_2^T (3.7548m) = 0$
+ 22,125KNm - $R_{Hz} (3m) - 2,824.5KNm = 0$
- $R_{Hz} (3m) + 19,296.92KNm = 0$
 $R_{Hz} = 6,432.3KN$
Sustitución de R_{Hz} en (1.1)
 $R_{Bz} + R_{Hz} - 13,996.8KN = 0$
 $R_{Bz} + 6,432.3KN - 13,996.8KN = 0$
 $R_{Bz} - 7,564.5KN = 0$
 $R_{Bz} = 7,564.5KN$

Donde los resultados obtenidos son:

$$R_{Bz} = 7,564.51KN$$

$$R_{By} = 36,600.48N$$

$$R_{Hz} = 6,432.3KN$$

$$R_{Hy} = 598,438.1N$$

$$W_1 = 26,633.8Kg(9.81) = 261,277.58N$$

$$W_2 = 38,100Kg(9.81) = 373761N$$

$$T_1 = T_2 = 35,400KN - m$$

56



Se generan diagramas de fuerza cortante y de momentos en dos planos (x, y), (x, z).



Figura 27. Diagrama fuerza cortante y momento (x,y)



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Cálculos de los diagramas V y M en (x, y):

Segmento B-1

$$+\uparrow \sum F_y = 0;$$
 $R_{BY} - V_1 = 0$
 $36.6KN - V_1 = 0$ $V_1 = 36.6KN$

$$(+\uparrow \sum M_1 = 0; \qquad M_1 - R_{BY}(0) = 0 \qquad M_1 = 0$$

Segmento B-2

$$+\uparrow \Sigma F_y = 0;$$
 $R_{BY} - V_2 = 0$
 $36.6KN - V_2 = 0$ $V_2 = 36.6KN$

+ ↑ ∑
$$M_2 = 0;$$
 $M_2 - R_{BY}(1.5m) = 0$
 $M_2 - (36.6KN)(1.5m) = 0$ $M_2 = 54.9KN \cdot m$
 $M_2 - 54.9KN \cdot m$

Segmento B-3

$$R_{BY} - W_1 - V_3 = 0$$

+ $\uparrow \Sigma F_Y = 0;$
$$36.6KN - 261.2KN - V_3 = 0$$

$$-224.6KN - V_3 = 0$$

$$V_3 = -224.6KN$$

$$M_{3} + w_{1}(0) - R_{BY}(1.5m) = 0$$

+ $\uparrow \Sigma F_{Y} = 0;$
$$M_{3} - (36.6KN)(1.5m) = 0$$

$$M_{3} = 54.9KN \cdot m$$

$$M_{3} - 54.9KN \cdot m = 0$$

58



Segmento B-4

$$R_{BY} - W_1 - V_4 = 0$$

+ $\uparrow \sum F_Y = 0;$
$$36.6KN - 261.2KN - V_4 = 0$$

$$-224.6KN - V_4 = 0$$

$$V_4 = -224.6KN$$

$$\begin{array}{l} +\uparrow \sum M_{4}=0; \\ +\uparrow \sum M_{4}=0; \end{array} \begin{array}{l} M_{4}+w_{1}81.5)-R_{BY}(3m)=0 \\ M_{4}+(261.2KN)(1.5m)-(36.6)(3m)=0 \\ M_{4}+391.8KN\cdot m-109.8KN\cdot m=0 \\ M_{4}+282KN\cdot m=0 \end{array} \end{array} \qquad \qquad M_{4}=-282KN\cdot m$$

Segmento B-5

$$R_{BY} + R_{HY} - W_1 - V_5 = 0$$

+ $\uparrow \Sigma F_Y = 0;$
$$36.6KN + 598.4KN - 261.2KN - V_5 = 0$$

$$V_5 = 373.8KN$$

$$373.8KN - V_5 = 0$$

$$M_{5} + W_{1}(1.5m) - R_{BY}(3m) = 0$$

+ $\uparrow \sum M_{5} = 0;$
$$M_{5} + 391.8KN \cdot m - 109.8KN \cdot m = 0$$

$$M_{5} + 282KN \cdot m = 0$$

Segmento B-6

$$R_{BY} + R_{HY} - W_1 - V_6 = 0$$

+ $\uparrow \Sigma F_Y = 0;$
$$36.6KN + 598.4KN - 261.2KN - V_6 = 0$$

$$V_6 = 373.8KN$$

$$373.8KN - V_6 = 0$$

$$+ \uparrow \Sigma M_{6} = 0; \qquad \qquad M_{6} - R_{HY}(0.75m) + W_{1}(2.25m) - R_{BY}(3.75m) = 0 \\ M_{6} - (598.4KN)(0.75m) + 261.2KN(2.25m) - 36.6(3.75m) = 0 \\ M_{6} - 448.8KN \cdot m - 137.25KN \cdot m = 0 \\ M_{6} + 0 = 0 \\ \end{pmatrix}$$

 $M_{6} = 0$

59



Se generan diagramas de fuerza cortante y de momentos en dos planos (x, z).



Figura 28. Diagrama fuerza cortante y momento (x,z)


Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Cálculos de los diagramas V y M en (x, z):

Z-X

Segmento B-1

$$+ \uparrow \sum F_{z} = 0;$$

$$R_{Bz} - V_{1} = 0$$

$$V_{1} = 7,564.5KN$$

$$7,564.5KN - V_{1} = 0$$

$$+ \uparrow \sum M_{1} = 0;$$

$$M_{1} - R_{Bz}(0) = 0$$

$$M_{1} = 0$$

$$\begin{split} + \uparrow \sum F_z &= 0; \\ R_{Bz} - V_2 &= 0 \\ 7,564.5KN - V_1 &= 0 \\ + \uparrow \sum M_2 &= 0; \\ M_2 - R_{Bz}(1.5m) &= 0 \\ M_2 &= 11,346.75KN.m \\ M_2 - (7,564.5KN)(1.5m) &= 0 \end{split}$$

$$M_2 - (7,564.5KN)(1.5m) = 0$$
$$M_2 - 11,346.75KN = 0$$

$$+ \uparrow \sum F_{z} = 0;$$

$$R_{Bz} - W_{1}^{T} - V_{3} = 0$$

$$V_{3} = -7,185.5KN$$

$$7,564.5KN - 14,750KN - V_{3} = 0$$

$$-7,185.5KN - V_{3} = 0$$

$$+ \uparrow \sum M_{3} = 0;$$

$$M_{3} - R_{Bz}(1.5m) = 0$$

$$M_{3} = 11,346.75KN.m$$

$$M_{3} - (7,564.5KN)(1.5m) = 0$$

$$M_{3} - 11,346.75KN.m = 0$$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Segmento B-4

+
$$\uparrow \sum F_z = 0;$$

 $R_{Bz} - W_1^T - V_4 = 0$ $V_3 = -7,185.5KN$
 $7,564.5KN - 14,750KN - V_4 = 0$
 $-7,185.5KN - V_3 = 0$

$$+\uparrow\sum M_{4}=0;$$

$$\begin{split} M_4 + W_1^T (1.5m) - R_{B_2}(3m) &= 0 \\ M_4 + (14,750KN)(1.5m) - (7,564.5KN)(3m) &= 0 \\ M_4 + 22,125KN.m - 22,693.5KN.m &= 0 \end{split}$$

Segmento B-5

+ ↑
$$\sum F_z = 0$$
;
 $R_{Bz} - W_1^T + R_{Hz} - V_5 = 0$ $V_5 = -753.2KN$
7,564.5KN - 14,750KN + 6,432.3KN - $V_5 = 0$
- 753.2KN - $V_5 = 0$
+ ↑ $\sum M_5 = 0$;

$$M_{5} + W_{1}^{T} (1.5m) - R_{B_{z}}(3m) = 0$$

$$M_{5} + (14,750KN)(1.5m) - (7,564.5KN)(3m) = 0$$

$$M_{5} + 22,125KN.m - 22,693.5KN.m = 0$$

$$M_{5} - 568.5KN.m = 0$$

$$M_{5} = 568.5KN.m$$

Segmento B-6

+ ↑
$$\sum F_z = 0$$
;
 $R_{Bz} - W_1^T + R_{Hz} - V_6 = 0$ $V_6 = -753.2KN$
7,564.5KN - 14,750KN + 6,432.3KN - $V_5 = 0$
- 753.2KN - $V_6 = 0$

 $+\uparrow \sum M_{6}=0;$

$$\begin{split} M_{6} &- R_{Hz}(0.75m) + W_{1}^{T}(2.25m) - R_{Bz}(3.75m) = 0 \\ M_{6} &+ (6,432KN)(0.75m) - (14,750KN)(2.25m) - (7,564.5KN)(3.75m) = 0 \\ M_{6} &+ 4,824.2KN.m - 33,187.5KN.m - 28,366.9KN.m = 0 \\ M_{6} &= 0 \end{split}$$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



4.3.1 Selección del Material

La selección del material se realizó mediante el programa CES EDUPACK 2008, el cual dio como resultado 6 rangos de acero a elegir; ANSI 1020 - 1050,3140 – 3150,4340, 4820,5140 y 8620. De los cuales el acero 4340 tipo T y R, ya que se encuentra colocado con el 3er precio mas bajo de los 6 rangos mencionados [8].

4.3.2 Dimensionamiento de los diámetros del Sistema de Transmisión Directa

Se cambiaran los planos ortogonales como vectores para obtener momentos totales, de los diagramas V y M, ya anteriormente realizados [9].

Cambio de planos ortogonales como vectores para obtener momentos totales en "E".

Para E;

$$Longitud=1.5m$$
$$\sqrt{(55)^2 + (11,346.8)^2} = 11,346.93KN.m$$

T = 35,400 KNm

Para F;

Longitud = 1.95m

 $\sqrt{(-46.215)^2 + (1,359.38)^2} = 1,360.165 \text{ KN.m} \implies M_a = 1,360.165 \text{ KN.m}$

T = 35,400 KNm $\Rightarrow T_m = 35,400 KNm$

Para G;

Longitud=2.85m

$$\sqrt{(-248.445)^2 + (1,646.36)^2} = 1,665.0 \text{ KN.m} \implies M_a = 1,665.0 \text{ KN.m}$$

T = 35,400 KNm $\Rightarrow T_m = 35,400 KNm$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Para K;

Longitud=3.6532

$$\sqrt{(-38.05)^2 + (76.55)^2} = 85.485 \text{ KN.m} \implies M_a = 85.485 \text{ KN.m}$$

 $T = 35,400 \text{ KNm} \implies T_m = 35,400 \text{ KNm}$

Usando el criterio de ED- GOODMAN, ya que este criterio es bueno para diseño de ejes; es simple y confiable [10].

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left(\frac{2(K_f M_a)}{Se} + \frac{\left[3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{Sut} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Dado.- M_a : momento flexionante alternante. Dado.- T_m : par de tensión medio. Dado.- K_f : Factores de concentración de esfuerzos por fatiga flexión. Dado.- K_{fs} : Factores de concentración de esfuerzos por fatiga torsión. Dado $\rightarrow Sut$: Resistencia ultima a la tensión. Calcula $\rightarrow Se$: Resistencia a la fatiga.

Calculo de Se \rightarrow Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de la maquina en la geometría y condición de uso.

Ecuación de Marín:

$$Se = k_a k_b k_c k_d k_e k_f Se'$$
 $k \rightarrow ``k'' minúscula.$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Donde:

 k_a = Factor de modificación de la condición superficial.

 k_b =Factor de modificación de tamaño.

 k_c = Factor de modificación de carga.

 k_d = Factor de modificación de temperatura.

 k_e = Factor de confiabilidad.

 k_f = Factor de modificación de efectos varios.

Se'= Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

$$k_c = 1$$

 $k_d = 1$
 $k_e = 1$

Para calcular:

$$k_a = aS_{ut}^b$$

 S_{ut} = Resistencia a la tensión. *a* y *b* (ver Anexo A)

Calculando k_a

a = 4.51

$$k_a = aS_{ut}^{b}$$

 $k_a = (4.51)(1720)^{-0.265} = 0.6262$

 $k_b = 0.9$ $k_f = 1$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Para este caso $S_{ut} = Se'$

Se = (0.6262)(0.9)(1)(1,720MPa)Se = 969.36MPa

Para F

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left(\frac{2(K_f M_a)}{Se} + \frac{\left[3(K_{fs}T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{Sut} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Características de material acero 4340, con factor de seguridad 2.

K f y K ft (Ver Anexo B), cuando r/d=0.1 n = 2 $K_f = 1.7$ $K_{fs} = 1.5$ $Sut = 1,720 MPa = 1720 x 10^6 \frac{N}{m^2}$ Resistencia a la tensión. Se = 969 .36 MPa $M_a = 1,360 .165 KN .m$ $T_m = 35 ,400 KN .m$ Sustituyendo valores, se obtiene.

$$d = \left\{ \frac{16(2)}{\pi} \left(\frac{2(1.7)(1,360.165KN.m)}{969.36MPa} + \frac{\left[3((1.5)(35,400KN.m))^2\right]^{\frac{1}{2}}}{1,720MPa} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.84026 \quad m$$

 $d=0.84026m\approx 0.84m$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Relación típica $\frac{D}{d}$ para el soporte en un hombro es:

$$\frac{D}{d} = 1.2$$

así :

$$\frac{D_f}{d_f} = 1.2;$$

$$D_f = 1.2(d_f)$$

$$D_f = 1.2(0.8403m)$$

$$D_f = 1.00836m \approx 1.0m$$

Para E;

$$Longitud=1.5m$$
$$\sqrt{(55)^2 + (11,346.8)^2} = 11,346.93KN.m$$

T = 35,400 KNm

$$d = \left\{ \frac{16(2)}{\pi} \left(\frac{2(1.7)(11,346.93KN.m)}{969.36MPa} + \frac{\left[3((1.5)(35,400KN.m))^2\right]^{\frac{1}{2}}}{1,720MPa} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.9831 \ m$$

d = 0.98 m



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Relación típica $\frac{D}{d}$ para el soporte en un hombro es:

 $\frac{D}{d} = 1.2$ Donde: D = 1.2(0.9831) $\therefore D = 1.17$

D =1.1 m

Para G

$$d = \left\{ \frac{16(2)}{\pi} \left(\frac{2(1.7)(1,665.0KN.m)}{969.36MPa} + \frac{\left[3((1.5)(35,400KN.m))^2\right]^{\frac{1}{2}}}{1,720MPa} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.8454 \quad m$$

$$d = 0.8454m \approx 0.85m$$

Relación típica $\frac{D}{d}$ para el soporte en un hombro es:

$$\begin{aligned} \frac{D_G}{d_G} &= 1.2; \\ D_G &= 1.2(d_G) \\ D_G &= 1.2(0.8454m) \\ D_G &= 1.01448m \approx 1.0m \end{aligned}$$



Para K

$$d = \left\{ \frac{16(2)}{\pi} \left(\frac{2(1.7)(85.49KN.m)}{969.36MPa} + \frac{\left[3((1.5)(35,400KN.m))^2\right]^{\frac{1}{2}}}{1,720MPa} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.8182 \quad m$$

 $d=0.8182m\approx 0.82m$

Relación típica $\frac{D}{d}$ para el soporte en un hombro es:

$$\frac{D_{\kappa}}{d_{\kappa}} = 1.2;$$

$$D_{\kappa} = 1.2(d_{\kappa})$$

$$D_{\kappa} = 1.2(0.8182m)$$

$$D_{\kappa} = 0.98184m \approx 0.98m$$

La tabla 8, muestra las medidas de cada diámetro.

Tabla 8. Diámetros obtenido	os.
-----------------------------	-----

Diámetro	Unidades (m)
D1	0.85
D2	1.0
D3	0.98
D4	1.0
D5	0.85
D6	0.98
D7	0.82



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Cuando hay esfuerzos fluctuantes debidos a la flexión y torsión; y en algún momento se llegan a combinar estos esfuerzos de acuerdo con la teoría de falla por energía de distorsión, los esfuerzos de Von Mises para ejes giratorios, redondos y sólidos, sin tomar en cuenta las cargas axiales, están dados por:

$$\sigma_{a}' = (\sigma_{a}^{2} + 3\tau_{a}^{2})^{\frac{1}{2}} = \left[\left(\frac{32K_{f}M_{a}}{\pi d^{3}} \right)^{2} + 3\left(\frac{16K_{fs}T_{a}}{\pi d^{3}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\sigma_{m}' = \left[\left(\frac{32(1.7)(0)}{\pi (0.82)^{3}} \right)^{2} + 3\left(\frac{16(1.5)(35,400KN.m)}{\pi (0.82)^{3}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\sigma_{max}' = \left[(\sigma_{a}')^{2} + (\sigma_{m}')^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Calculo de esfuerzos en el punto K, es donde se coloca la carga de magnitud mayor del sistema.

Para el punto K Datos: $M_a = 85.5 KN.m$ $K_f = 1.7$ d = 0.82m $K_{fs} = 1.5$

$$T_m = 35,400 KN.m$$
$$T_a = 0$$
$$M_m = 0$$





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

$$\sigma_{a}' = (\sigma_{a}^{2} + 3\tau_{a}^{2})^{\frac{1}{2}} = \left[\left(\frac{32K_{f}M_{a}}{\pi d^{3}} \right)^{2} + 3\left(\frac{16K_{f3}T_{a}}{\pi d^{3}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Sustitució n

$$\sigma'_{a} = \left[\left(\frac{32(1.7)(85.5KN.m)}{\pi (0.82m)^{3}} \right)^{2} + 3 \left(\frac{16(1.5)(0)}{\pi (0.82)^{3}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_a' = 2,685,181.12 Pa \approx 2.7 Mpa$$

$$\sigma'_{m} = (\sigma_{m}^{2} + 3\tau_{m}^{2})^{\frac{1}{2}} = \left[\left(\frac{32K_{f}M_{m}}{\pi d^{3}} \right)^{2} + 3\left(\frac{16K_{fs}T_{m}}{\pi d^{3}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Sustitució n

$$\sigma'_{m} = \left[\left(\frac{32(1.7)(0)}{\pi (0.82)^{3}} \right)^{2} + 3 \left(\frac{16(1.5)(35,400 \, KN.m)}{\pi (0.82)^{3}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\sigma'_{m} = 849,539,744 \, Pa$$
$$\sigma'_{m} = 849.9 \, Mpa$$

$$\sigma'_{\text{max}} = \left[(\sigma'_a)^2 + (\sigma'_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Sustitució n

$$\sigma'_{\text{max}} = \left[(2.7MPa)^2 (849MPa)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$\sigma'_{\text{max}} = 849.5MPa$$



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



4.3.3 Cojinetes

Los cojinetes seleccionados son de la compañía SKF, no se encuentran en catalogo ya que están sobredimensionados, se necesita un diseño especifico [12].

Características generales de los cojinetes:

- Cojinete 1: rodamiento axial de rodillos a rótula
- Cojinete 2: rodamiento de rodillos cilíndricos (4 hileras)



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



4.3.4 Dibujo del Sistema de Transmisión

Con base en la Norma ASME Y14.5M – 1994 [11], el dimensionamiento y tolerancias del Sistema de Transmisión Directa se muestra en la figura 30.



Figura 29. Sistema de transmisión directa.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



4.4 Análisis Estático Simple

La evaluación estática determina el comportamiento del sistema de transmisión directa

ante cargas estáticas. Estas cargas estáticas generan un primer estado de esfuerzos, el cual

contribuye y aporta una influencia dinámica al elemento [13].

Para la simulación se tienen las siguientes condiciones: Cargas aplicadas:

- Propio peso del elemento
- Peso del rotor de imanes permanentes
- Peso del cubo
- Peso de las palas.

Tipo de soportes en el elemento:

• Soportes Cilíndricos

Material: ACERO AISI 4340 TyR

- Densidad: 7.8 (g/cm3)
- Resistencia a la tensión: 1720 MPa
- Resistencia a la Fluencia: 1590 MPa
- Modulo de elasticidad: 200 GPa
- Dureza HB: 409

El modelo es el siguiente:



Figura 30. Condiciones de simulación para el sistema de transmisión directa.



Los resultados de la simulación arrojaron el siguiente nivel de esfuerzos, con un máximo cercano a 6.8 MPa



Figura 31. Esfuerzos (Von – Mises) en el elemento.

Los resultados arrojados respecto a la deformación en la dirección X, con un máximo cercano a 7.35 micro m.



Figura 32. Deformación del elemento en la dirección X.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Los resultados arrojados respecto a la deformación total, con un máximo cercano a 0.142 micro m.



Figura 33. Deformación Total del elemento.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



4.5 Análisis Modal

La evaluación Modal permite determinar las frecuencias naturales y los modos de vibrar del elemento. Al usar el modelo estático como antecedente del Modal, no es necesario redefinir las condiciones de soporte, ya que se utilizan las mismas [12].

Se evaluaron los 6 primeros modos de vibrar. Los resultados obtenidos para las frecuencias naturales se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Frecuencias naturales obtenidas de la simulación.

MODO	FRECUENCIA (Hz)
1	345
2	346.43
3	510.95
4	690.18
5	693
6	754.98

Las siguientes figuras representan los modos de vibración gráficamente:



Figura 34. Modo de vibración 1.









Figura 36. Modo de vibración 3.



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación









Figura 38. Modo de vibración 5.

	Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación	
Total Deformation Type: Total Deformation Frequency: 754.98 Hz Unit: m 05/12/2011 08:00 a.m.		
0.010997 Max 0.0097756 0.0085536 0.0073317 0.0061097 0.0048878 0.0036658 0.0024439 0.0012219 0 Min		

Figura 39. Modo de vibración 6.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



4.6 Análisis Estático a 20 rpm

En el análisis estático a 20 rpm, se utilizan todas las fuerzas que intervienen en el funcionamiento del Sistema de Transmisión Directa (fuerzas normales, tangenciales y una velocidad de operación máxima de 20 rpm.

La siguiente tabla muestra las cargas utilizadas en la simulación:

Tabla 10. Cargas utilizadas en la simulación estática a 20 rpm.

Tipo de carga	Magnitud
W1 - rotor de imanes permanentes	261 277.58 N
W2 – sistema cubo- palas	373 761 N
T – par de torsión del sistema	35 400 KN-m
Velocidad Máxima de operación	20 rpm



Figura 40. Condiciones de Simulación Estática a 20 rpm.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



De la simulación se obtienen Esfuerzos de Von Mises cercanos a 1 GPa.



Figura 41. Esfuerzo (Von – Mises).

La simulación arrojo valores de 0.002 m, en la deformación total.



Figura 42. Deformación Total del elemento.



La simulación arrojo valores de 0.13 micro m, en la deformación dirección X..



Figura 43. Deformación en la dirección X.



Análisis de Fatiga

Se tomo como referencia, las condiciones del Análisis Estático a 20 rpm [12].

Life Type: Life	
Time: 1	
05/12/2011 07:55 a.m.	
3.9045e5	
1.5245e5	
- 59524	
23241	
9074.3	
- 3543	
1383.4	
540.14	
210.89 Min	

Figura 44. Comportamiento del elemento a 1000 000 de ciclos.



Figura 45. Daños por fatiga a 1000 000 de ciclos.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación





Figura 46. Fatiga multiaxial.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Análisis de resultados

Se evaluaron los 6 primeros modos de vibrar. Los resultados obtenidos para las frecuencias naturales se muestran en la tabla 11. Con este cálculo modal se puede mencionar que las frecuencias que pueden provocar una resonancia son las que se encuentran en la tabla 11, en un rango de 345 Hz a 754.98 Hz.

MODO	FRECUENCIA (Hz)
1	345
2	346.43
3	510.95
4	690.18
5	693
6	754.98

Tabla 11. Frecuencias naturales obtenidas de la simulación.

Por su parte las frecuencias naturales que presenta la pala tienen un rango de 0 Hz a 17.947 Hz, el Modo 1 de vibración de la pala es 0.79 Hz, el Modo 2 es de 1.8 Hz y el Modo 3 es de 2.2 Hz. No representa ningún problema para ambos elementos el Modo 1 de vibración del Sistema de Transmisión Directa, ya que los 3 primeros modos de vibrar son los más representativos.

Las siguientes figuras representan los modos de vibración gráficamente:



Figura 47. Modo de vibración 1, representado por vectores.



Figura 48. Modo de vibración 2, representado por vectores.



Figura 49. Modo de vibración 3, representado por vectores.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



El comportamiento que el Sistema de Transmisión Directa tiene cuando es sometido a cargas estáticas simples; las cargas que presenta este análisis son las que ejerce el rotor de imanes permanentes (261 277.58 N) y el sistema cubo – palas (373 761 N), y el propio peso del elemento. Puede apreciarse en la figura 50. El elemento muestra un esfuerzos de Von – Mises cercano a 6.8 MPa, muy por debajo de la Resistencia a la Tensión que para el material es de 1720 Mpa. Se considera que el material se encuentra dentro de su límite elástico. Esto es consecuencia del factor sugerido por el cliente igual a 2.



Figura 50. Esfuerzos Equivalente de Von – Mises en el elemento.

Las deformaciones totales que se obtuvieron de la simulación tiene una magnitud de 0.142 micro metros. Estos resultados no son considerables, aunque esta deformación máxima se encuentra en el empotramiento del sistema cubo – pala (donde se encuentra la carga máxima del sistema). En los apoyos la deformación en nula.



Figura 51. Deformación Total del elemento.

En el análisis estático a 20 rpm, se emplean todas las fuerzas que intervienen en el funcionamiento del Sistema de Transmisión Directa (fuerzas normales, par de torsión y una velocidad de operación máxima), provocadas por el sistema cubo – palas, rotor de imanes permanentes y el par de torsión que ejercen los mismos elementos.

La simulación muestra Esfuerzos de Von Mises cercanos a 1 GPa en el punto K, es un esfuerzos muy cercano al calculado analíticamente que es de 0.85 GPa, por lo que se puede asegurar que los resultados obtenidos son confiables.



Figura 52. Esfuerzo (Von – Mises).



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



La deformación total que presenta el Sistema de Trasmisión Directa al ser sometida a criterios máximos de operación (velocidad máxima de operación, cargas totales), muestran valores de 0.002 m, en la deformación total. Incrementando la deformación aproximadamente 1000 veces con respeto a la carga estática simple y manteniéndose en el rango de lo aceptable. Teniendo como lugar el empotramiento del sistema cubo- pala, que es el lugar donde se genera el par de torsión del sistema.



Figura 53. Deformación Total del elemento.

El análisis de fatiga que se muestra en la figura 54, referente al vida del elemento respecto a 1000 000 ciclos equivalente a 1 unidad, se pueden apreciar las zonas del elemento que tienen mas vida con respecto a otras en el mismo tiempo. Podemos relacionar el análisis estático a 20 rpm, y observar que donde se encuentran los esfuerzos máximos es donde la vida de la zona del elemento es mas corta. Esto sirve como referencia para programar mantenimiento al Sistema de Transmisión Directa, en un cierto período. La figura 54, muestra la vida del elemento a 1000 000 ciclos.



Figura 54. Comportamiento del elemento a 1000 000 de ciclos.

La figura 55, muestra el daño por fatiga que sufre el elemento al ser sometido a 1000 000 de ciclos. Este daño por fatiga es la relación que existe entre vida del diseño entre la vida disponible del elemento, por lo que el valor menor a 1 rechazaría el diseño propuesto. La simulación muestra que el valor mínimo es de 1000 y un máximo de 4.74 M, con lo que el Sistema de Transmisión Directa presenta muy poco daño a la fatiga, responsabilidad que se le adjudi<u>ca al factor de seguridad de 2.</u>



Figura 55. Daños por fatiga a 1000 000 de ciclos.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



La figura 56, muestra el Indicador de Biaxialidad del Sistema de Transmisión Directa sometida a fatiga. Generalmente las propiedades de un material sometido a fatiga están basados en esfuerzos uniaxiales, pero en la vida real esta sometido aun estado de esfuerzos multiaxial. El resultado obtenido de esta simulación es la relación que hay entre el esfuerzo principal de menor magnitud entre el de mayor magnitud.

Cuando alguno de ellos es 0 se ignora la biaxialidad, corresponde aún esfuerzo uniaxial.

Cuando tiene un valor de "-1" corresponde a cortante puro.

Cuando tiene un valor "1" corresponde a un estado biaxial puro.

Por lo que podemos asegurar que el Sistema de Transmisión Directa, se encuentra en estado biaxial puro.



Figura 56. Fatiga multiaxial.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



Referencias:

[1] Base de datos del Servicio Meteorológico Nacional

[2] IEC International Standard. Wind turbine generator system – Part I: safety requirements;1994.

[3] Technical Note: IEC 1400-1 GL Test Regulation,2000.

[4] BANG, KONG y SUGIYAMA. "Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life".2004. *Journal of Energy*. Vol. 30,2004, pp.2101-2114.

[5] JURECZKO, MEZYK y PAWLAK. "Optimization of wind turbine blades".2005. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 167, 2005, pp. 463-471.

[6] Manual VESTAS, 2011.

[7] Technical Manual, GOLDWIND – ABB. 2011.

[8] CES EDUPACK 2008.

[9] BEER, Ferdinand. Mechanical of Materials. 2002; Mc Graw-Hill. 2002.

[10] BUDYNAS, Richard. *Diseño en ingeniería mecánica*. México 2008: Mc Graw-Hill. 2008.

[11] Norma ASME Y14.5 – 1994.

[12] www.skf.com

[13] Manual ANSYS 11. Workbench.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación



CONCLUSIONES

Al observar los datos del viento, que se generan en la Ventosa, Oaxaca, México; podemos asegurar que la mayor parte del año se mantiene a una velocidad promedio de 3 m/s, esta velocidad es la ideal para la operación de aerogeneradores de gran producción.

Al observar los resultados obtenidos de esfuerzos de Von Mises para esfuerzos fluctuantes calculados analíticamente y los obtenidos en la simulación, se observa que son similares, presentan un margen de diferencia de 15% (ver fig. 57). Al observar el análisis modal en el Sistema de Transmisión Directa y el de la pala, se observa que sus frecuencias de vibración son muy distintas; la pala presenta una vibración máxima de 18 Hz, el Sistema de Transmisión Directa tiene un mínimo de 350 Hz; con lo que no entraran en resonancia.



Figura 57. Esfuerzo (Von – Mises).

Cabe mencionar que las deformaciones que se presentan son muy bajas, se encuentran en un nivel muy aceptable. En análisis por fatiga se observa que el elemento presenta un daño por fatiga muy superior a 1000 veces la unidad, es consecuencia del factor de seguridad 2 con el que se diseño el Sistema.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Es deseable, realizar el diseño de una pala que tenga como parámetros, las características del viento que se genera en la zona conocida como la Ventosa en Oaxaca, México. Al analizar el comportamiento de la pala bajo esas condiciones mejoraría el aprovechamiento de ese recurso natural de esa región.

Así mismo, la simulación de ráfagas de viento que se puedan obtener en las palas de los vientos en aquella región, permitirá establecer situaciones en las cuales una pala pueda trabajar a altas ráfagas de viento, ya que la mayoría de las palas para una generación de 1.5 MW, al tener ráfagas de viento considerables dejan de operar, esto tiene como consecuencia no generar energía eléctrica.

Por otro lado, el sistema de transmisión directa sufre el incremento de la temperatura, consecuencia de los imanes permanentes; por lo que realizar un estudio de transferencia de calor, complementaría la investigación realizada; resultaría de un análisis mas complejo inevitablemente.

Finalmente, la fatiga de sus elementos de acoplamiento como son los cojinetes, el cubo, las palas y la cabina que resguarda algunos elementos del aerogenerador, la corrosión, el envejecimiento, fallas estructurales etc., pueden provocar deformaciones más de las permitidas. Por ello, realizar estudios sobre los distintos elementos que conforman el aerogenerador, permitirá realizar diseños mas innovadores, económicos y con alta eficiencia.





Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

ANEXO A

Acabado	Factor a		Exponente	
superficial	S _{ut} , kpsi	S _{ut} , MPa	Ь	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085	
Maguinado o laminado en frí	o 2.70	4.51	-0.265	
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718	
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995	

De C. J. Noll y C. Lipson, "Allowable Working Stresses", en Society for Experimental Stress Analysis, vol. 3. núm. 2, 1946, p. 29. Reproducida por O. J. Horger (ed.), *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York. Copyright © 1953 por The McGraw-Hill Companies, Inc. Reproducido con autorización.

ANEXO B

the second s		and the second se
2.7	2.2	3.0
1.7	1.5	1.9
2.2	3.0	-
1.7	-	-
5.0	3.0	5.0
A REAL PROPERTY AND A REAL	2.7 1.7 2.2 1.7 5.0	2.72.21.71.52.23.01.7-5.03.0